

Estudio monográfico sobre las respuestas de las plantas al estrés hídrico por déficit, como estrategia para los sistemas productivos adaptados al cambio climático.

Claudia Lorena Alzate López

Universidad Tecnológica de Pereira
Facultad de Ciencias Ambientales
Administración Ambiental
Pereira, 2021

Estudio monográfico sobre las respuestas de las plantas al estrés hídrico por déficit, como estrategia para los sistemas productivos adaptados al cambio climático.

Claudia Lorena Alzate López

1.225.092.343

Monografía para optar al título de:

Administradora Ambiental

Directora: PhD. Ana María López Gutiérrez

Universidad Tecnológica de Pereira

Facultad de Ciencias Ambientales

Administración Ambiental

Pereira, 2021

DEDICATORIA

A mi madre, por luchar día a día por sus hijos.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por brindarme apoyo en todo mi proceso de formación profesional. A la profesora Ana María López G, por guiarme en esta experiencia, por el apoyo y el tiempo.

A la Facultad de Ciencias Ambiental por ser mi casa durante estos cinco años, por los amigos que pude conocer y que siempre voy a llevar conmigo.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ana María López Gutiérrez

Directora trabajo de grado

Pereira 2021

Contenido

1. Introducción.....	9
2. Objetivos.....	10
3. Justificación	11
4. Marco Conceptual	12
5. Metodología.....	15
6. Estrés hídrico en las plantas.....	17
7. Resultados.....	18
7.1. Primer objetivo específico.....	18
7.2. Segundo objetivo específico.....	29
7.2.1. Respuestas en plantas cultivables	30
7.3. Tercer objetivo específico	39
7.3.1. Adaptación a la variabilidad climática entre los caficultores de las cuencas de los ríos Porce y Chinchiná, Colombia.	41
7.3.2. Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas.	42
7.3.3. Agricultura Colombiana: Adaptación al Cambio Climático.	44
7.3.4. Estrategias de los sistemas de producción agrícola y forestal ante el cambio climático.	44
7.3.5. Representaciones de agricultores andinos colombianos sobre el cambio climático y estrategias de mitigación y adaptación.....	47
7.3.6. Efectos del cambio climático: Una mirada al campo.	48
8. Recomendaciones	49
9. Conclusiones.....	56
10. Bibliografía	57

Lista de figuras

Figura 1. Estrés hídrico. -----	19
Figura 2. Cierre de estomas.-----	21
Figura 3. Cierre y apertura de un estoma. -----	21
Figura 4. Ajuste osmótico. -----	22
Figura 5. Ubicación de auxinas y giberelinas. -----	23
Figura 6. Acción del etileno en las hojas. -----	24
Figura 7. Ubicación citoquininas. -----	25
Figura 8. Efecto ácido abscísico. -----	26
Figura 9. Expansión foliar-----	26
Figura 10. Dinámica de la humedad en el suelo durante el periodo experimental. -----	33
Figura 11. Desarrollo de la altura alcanzada por las plantas en los tratamientos.-----	33
Figura 12. Dinámica del área foliar específica (AFE).-----	34
Figura 13. Contenido de clorofilas totales en los tratamientos. -----	35
Figura 14. Tasa de fotosíntesis neta en plantas de banano cv. 'Pineo Gigante' (Musa AAA) sometidas a condiciones simuladas de estrés hídrico. -----	36
Figura 15. Efecto de la exposición a condiciones de estrés hídrico sobre la tasa de transpiración foliar de banano cv. 'Pineo Gigante' (Musa AAA).-----	37
Figura 16. Efecto de la exposición a condiciones de estrés hídrico sobre la conductancia estomática de plantas de banano cv. 'Pineo Gigante' (Musa AAA).-----	38
Figura 17. Plántulas de piña. -----	39
Figura 18. Sistema agroforestal de producción de café con plátano y nogal cafetero. -----	45
Figura 19. Sistema agroforestal de producción de café con plátano y nogal cafetero. -----	46
Figura 20. Manejo de almacigos para el establecimiento de cafetales.-----	46
Figura 21. Representación no quema de los cultivos. -----	50
Figura 22. Cosecha de frijol sobre arbustos. -----	51
Figura 23. Barreras vivas. -----	52
Figura 24. Cercas vivas. -----	53
Figura 25. Barrera rompeviento.-----	53
Figura 26. Cercas vivas. -----	54
Figura 27. Rotación de cultivos. -----	55

Lista de Tablas

Tabla 1. Resultados Google Académico -----	18
Tabla 2. Resultados Scopus -----	18
Tabla 3. Resultados Science Direct. -----	18
Tabla 4. Resultados SciELO. -----	19
Tabla 5. Resultados AGRIS. -----	19
Tabla 6. Mecanismos de protección frente al déficit hídrico reiterado en plantas. -----	20
Tabla 7. Respuestas morfológicas, fisiológicas y bioquímicas de las plantas al estrés por sequía. -----	27
Tabla 8. Respuestas morfológicas, fisiológicas y bioquímicas de las plantas. -----	27
Tabla 9. Resultados tratamiento del cafeto. -----	30
Tabla 10. Resultados plántulas de cacao. -----	31
Tabla 11. Respuestas del tomate ante estrés hídrico. -----	32
Tabla 12. Resultados Google Académico tercer objetivo. -----	40
Tabla 13. Resultados Scopus tercer objetivo. -----	40
Tabla 14. Resultados ScienceDirect tercer objetivo. -----	40
Tabla 15. Resultados Scielo tercer objetivo. -----	40
Tabla 16. Resultados Agris tercer objetivo. -----	41
Tabla 17. Estrategias de adaptación caficultores Porce y Chinchiná. -----	41
Tabla 18. Estrategias de adaptación de la agricultura colombiana. -----	44
Tabla 19. Estrategias de los agricultores andinos colombianos. -----	48

RESUMEN

El cambio climático se compone de eventos meteorológicos que tienen influencia sobre el funcionamiento de los sistemas naturales; este se manifiesta en alteraciones de la biodiversidad, en la productividad y fuentes de alimento, y, por consiguiente, en la vida cotidiana de la sociedad.

Esta monografía presenta una serie de respuestas morfológicas y fisiológicas que son manifestadas por las plantas al encontrarse ante una situación de estrés por déficit hídrico, además, se recopilan también estudios realizados en diferentes cultivos para determinar las posibles afectaciones y respuestas de estos, ya que desde allí pueden evaluarse y clasificarse aquellos cultivos que sean resilientes ante el cambio climático, lo que es importante para el suministro de alimentos a la población.

Por último, se describen algunas prácticas de manejo que son útiles y exitosas, con el fin de que los cultivos se adapten a los cambios producidos en el medio por el cambio climático, las cuales son importante para los pequeños productores que no tienen acceso a tecnologías avanzadas o a un alto capital.

Palabras claves: Fisiología, morfología, adaptación, cambio climático.

ABSTRACT

Climate change is made up of meteorological events that influence the functioning of natural systems; This manifests itself in alterations in biodiversity, in productivity and in food sources and, consequently, in the daily life of society.

This monograph presents a series of morphological and physiological responses that are manifested by plants in a situation of stress due to water deficit, in addition, studies carried out in different crops are also compiled to determine the possible effects and responses of these, since from there they are They can evaluate and classify those crops that are resilient to climate change, which is important for the supply of food to the population.

Finally, some useful and successful management practices are described, so that crops adapt to the changes produced in the environment by climate change, which are important for small producers who do not have access to technologies. advanced or high capital.

Keywords: physiology, morphology, adaptation, climate change.

1. Introducción

A lo largo de la historia los seres vivos han evolucionado y se han adaptado a su entorno, debido a cambios en las condiciones del medio. Hoy en día el cambio climático, por ejemplo, ha afectado fuertemente a los seres vivos y ha cambiado considerablemente su medio. Esta alteración en el clima que se le atribuye a las actividades humanas ha generado presiones sobre los sistemas vivos, impactando por ejemplo los sistemas sociales, sus modos de producción y medios de vida y, por otro lado, se han alterado también los procesos ecológicos, teniendo como respuesta variaciones en la distribución e incluso la morfología de plantas y animales.

La presente monografía pretende analizar aspectos relevantes de la investigación sobre adaptaciones de las plantas ante el estrés hídrico por déficit, como una estrategia de mitigación al cambio climático en sistemas productivos.

Contiene una serie de búsquedas en bases de datos sobre el tema de estrés hídrico y adaptaciones de las plantas ante este. Además de información sobre los sistemas productivos que hayan identificado cambios en sus cultivos debido al cambio climático, pero que se hayan podido adaptar, esto con el fin de analizar el desarrollo de este tema y reconocer casos exitosos en sistemas productivos, que puedan ser recomendados dentro de esta monografía. Estas búsquedas serán presentadas por medio de tablas resumen, cuadros sinópticos e imágenes.

2. Objetivos

Objetivo General: Analizar mediante un estudio monográfico, los aspectos más relevantes de la investigación sobre la adaptación de las plantas al estrés hídrico por déficit, como estrategia de mitigación al cambio climático en sistemas productivos.

Objetivos específicos

- Revisar el contexto fisiológico y morfológico de las plantas cuando se enfrentan a situaciones de estrés hídrico por déficit.
- Identificar los aspectos relevantes del uso de plantas con adaptaciones para estrés hídrico por déficit, con el fin de establecer estrategias aplicables en sistemas productivos.
- Revisar las aplicaciones de las propuestas de manejo para los efectos del cambio climático sobre sistemas de cultivo a pequeña escala, identificando casos exitosos que permitan recomendar su implementación.

3. Justificación

En el proceso de formación del Administrador Ambiental se desarrollan estrategias y técnicas que permiten abordar cada uno de los componentes que constituyen un territorio; que ayudan a comprender la importancia y el papel que juegan cada uno de estos, para así aproximarse a las causas o motivos por los cuales estos factores se transforman y generan una dinámica en dicho espacio.

Esta dinámica puede ser interpretada a través de los procesos de desarrollo de la sociedad. En Colombia, por ejemplo, el desarrollo de la sociedad se da principalmente a través del territorio, por medio del sector primario. Más explícitamente por la agricultura; las características climáticas y geográficas de este país lo hacen apto para el pleno desarrollo de este tipo de actividades.

Sin embargo, las anomalías climáticas generadas por el cambio climático a través de la variabilidad climática han generado impactos socioeconómicos en el territorio. La agricultura, por ejemplo, depende directamente del comportamiento de la temperatura. (CEPAL, 2011)

Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en el segundo trimestre de 2018 la economía colombiana creció un 2,8%. En el caso del sector de agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca el PIB se incrementó 5,9%, ocupando el segundo lugar después del renglón de actividades profesionales, científicas y técnicas. Lo que resalta la importancia de este sector productivo en el desarrollo del país.

Es importante reconocer el aporte que este sector hace a la economía colombiana, pero aún más importante es identificar, que los efectos del cambio climático pueden ser aún más graves en aquellas economías campesinas, que, si bien son importantes para el desarrollo de la agricultura, pero que en algunos casos sólo tienen este medio para su subsistencia. De esta manera se genera la necesidad de reconocer materiales vegetales que se adapten a las condiciones climáticas cambiantes, ya que por medio de estas actividades se satisfacen las necesidades básicas de estas familias y el Administrador Ambiental debe de estar en la capacidad de reconocer problemáticas ambientales que se desarrollan en el territorio y de encontrar una solución por medio de la visión sistémica e interdisciplinaria, donde hombre y naturaleza están relacionados directamente. Por lo tanto, es pertinente para el profesional ambiental acompañar estos procesos porque es un gestor ambiental que está en capacidad de asesorar a los sectores productivos ante situaciones que afectan sus procesos económicos como lo es el cambio climático.

4. Marco Conceptual

Los ecosistemas, la salud humana, los sistemas de producción agrícola se han visto gravemente afectados por los cambios presentados a nivel ambiental en los últimos años. Dado el creciente aumento de la población mundial, se ha generado una mayor demanda de alimentos. Pero, con los cambios que se han presentado, se han generado también impactos sobre la productividad, relacionados con el estrés que presentan las plantas, debido al cambio climático.

Las influencias climáticas empeoran el panorama de los cultivos actuales, en los cuales ya se evidencia una productividad inestable. Se pronostica una mayor frecuencia de sequías y fuertes lluvias, fluctuaciones de temperatura, salinidad y ataques de plagas, provocando así un menor rendimiento en los cultivos y por tanto amenazas a la seguridad alimentaria. Es por esto, que la tarea de estos momentos es identificar y multiplicar nuevos cultivares que ayuden a disminuir esta presión sobre la seguridad alimentaria y la economía (Raza et al., 2019).

Para una agricultura sostenible y una seguridad alimentaria es necesario cultivar plantas tolerantes al estrés y comprender sus respuestas en diferentes condiciones de estrés. Algunos autores han identificado que las plantas pueden variar la expresión de sus genes, fisiología y metabolismo ante cualquier variación de las condiciones ambientales. Por ejemplo, algunos estudios revelan que en plantas de café sometidas a estrés hídrico constante se presentan mayores procesos de fotosíntesis, en comparación a las plantas que sólo son sometidas a un evento de estrés hídrico (Raza et al., 2019).

Los mecanismos morfológicos, biológicos y bioquímicos de las plantas se han visto gravemente afectados por el estrés abiótico. Aunque para las condiciones climáticas que se predicen para el futuro, se habla de una rápida propagación de las reacciones fisiológicas, con variaciones menores en la fructificación y la floración. Teniendo en cuenta estas condiciones se ha propuesto y evaluado algunas metodologías para hacer frente a la situación.

Se ha identificado que algunos agricultores han adoptado estrategias como la rotación de cultivos, cambios del tiempo de siembra y cosecha, técnicas de riego, variación de los esquemas de cultivos, entre otros, y desde una mirada más científica se ha hablado de estrategias de genética y genómica, buscando información genética que permita la mejora del desarrollo del cultivo, se estudian diferentes marcadores moleculares en la genómica de poblaciones en todo el medio ambiente en muchos individuos para descubrir nuevos patrones de variación y ayudar a determinar si los genes tienen funciones en rasgos ecológicos significativos (Raza et al., 2019).

Otros autores han hablado de la importancia del manejo del recurso suelo, agua y nutrientes. Los residuos de los cultivos son esenciales, ya que estos pueden ayudar a proteger el suelo de procesos de erosión y ayudan a prevenir la pérdida de humedad durante la temporada de crecimiento y ayuda a disminuir el riesgo de enfermedades en los cultivos.

Con el tiempo esta materia orgánica se incorpora al suelo, mejorando su estructura y jugando un papel importante en la disponibilidad de nutrientes. Una estructura del suelo con una mezcla favorable de poros grandes y pequeños favorece el crecimiento de las raíces y por otro lado la materia orgánica ayudará a reciclar los nutrientes. El uso del agua puede mejorarse usando sistemas de irrigación más eficientes, con pérdidas de agua menores (Parry & Medrano, 2005).

Los suelos en las regiones áridas y semiáridas son más vulnerables a la degradación del suelo por erosión y salinización. Las prácticas agrícolas inadecuadas e intensivas han aumentado este problema, se puede llegar al punto de causar desertificación cuando hay una degradación severa. Las zonas menos fértiles son las más frágiles, pero se han cultivado debido a la presión demográfica que existe. En estos casos, se produce una sobreexplotación de recurso hídrico, ya que se utiliza para cultivar en tierras infértiles con suelos arenosos y rocosos, limitando la posibilidad de usar este recurso en otros usos. Por tanto, la optimización del uso del agua se puede lograr promoviendo el riego eficiente, y reutilización del agua (Parry & Medrano, 2005).

Es importante resaltar en este punto que la adopción de estas estrategias por parte de los agricultores es irregular, ya que muchos de estos no cuentan con factores socioeconómicos adecuados para su implementación, por ello es importante relacionarlo con los modelos de desarrollo regional que se ejecutan.

Estos autores resaltan la importancia de un fitomejoramiento y de la biotecnología para garantizar que el agua se use de manera más eficiente en los cultivos. De esta manera se puede aumentar el rendimiento de cultivos bajo sequía aproximadamente a la mitad de la tasa alcanzada por cultivos de zonas templadas. (Parry & Medrano, 2005)

Por otro lado, siguiendo otras investigaciones también se ha identificado que las plantas pueden retardar la deshidratación o mantener la hidratación del tejido, economizando agua o consumiéndola en grandes cantidades cuando es posible. Otro mecanismo es la tolerancia a la deshidratación, que es la capacidad de funcionar estando deshidratada.

Como ya se mencionó anteriormente, la disponibilidad y el uso del agua está directamente relacionada con la productividad. Dentro de las estrategias de adaptación al déficit hídrico, se encuentran la inhibición de la expansión foliar, aumento de la profundidad de las raíces y cierre estomático. En un periodo de sequía, la parte aérea de la planta seguirá creciendo hasta que la absorción del agua sea una limitante. La relación de biomasa raíz: parte aérea, parece estar gobernada por un balance entre el agua absorbida por las raíces y la fotosíntesis de la parte aérea. Esto significa que los productos fotosintéticos que no son usados para el crecimiento foliar son acumulados en las extremidades de las raíces que crecen en busca de agua (Taiz & Zeiger 2009, Lambers 2008, Salisbury & Ross 2000). El área foliar de las plantas va cambiando una vez sus hojas alcanzan la madurez. Si la planta sufre un estrés hídrico después que su área foliar se ha desarrollado, la planta pierde hojas. Otras respuestas identificadas al estrés hídrico son: el depósito de cera sobre la superficie foliar, que hace de la cutícula una capa espesa, para disminuir la pérdida de agua por la

epidermis; y la disipación de energía sobre las hojas, que genera cambios en el tamaño y orientación de las hojas (Taiz & Zeiger 2009, Lambers et al. 2008, Salisbury & Ross 2000).

La agricultura y el cambio climático se conectan internamente, ya que el cambio climático es la principal causa de tensiones bióticas y abióticas, que tienen efectos adversos en la agricultura de una región. Según algunos informes, la agricultura se considera la actividad más amenazada y afectada negativamente por los efectos del cambio climático. Por tanto, la agricultura climáticamente inteligente es la única forma de reducir este impacto negativo. Las propuestas, metodologías o técnicas presentadas no son sólo un alivio a la seguridad alimentaria, sino también una respuesta a cada una de esas economías campesinas que buscan su sustento en la agricultura y que no han tenido alguna respuesta ante los cambios que han presenciado.

5. Metodología

Esta monografía tiene las características de una investigación de tipo explicativa, basado en las ideas de (Barrera, 2000), por medio de esta, se determinan las causas o el por qué de algo, o encontrar los procesos que permiten comprender de qué manera ocurre un evento. Se pretende encontrar la relación entre eventos como el cambio climático y las adaptaciones de las plantas, frente a este. Pero no se ejerce un control sobre las variables. En el nivel explicativo de la investigación se pretende comprender la realidad a través de leyes científicas o teorías. La teoría proporciona una guía importante para la dirección de la investigación, mediante la determinación de áreas en las que puedan existir relaciones significativas.

Esta monografía hace parte del proyecto "EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA AL ESTRÉS HÍDRICO EN MATERIALES PROMISORIOS DE MORA DE CASTILLA", proyecto financiado por la Universidad Tecnológica de Pereira e identificado con código 2-20-3.

Dentro de este tipo de metodologías cualitativas se han descrito diversas formas de investigación tales como: estudios cualitativos básicos o genéricos, etnografía, fenomenología, teoría fundamentada, estudios de caso.

- Estudio de caso

El estudio del caso se puede definir por Hernández- Sampieri y Mendoza, como “estudios que al utilizar los procesos de investigación cuantitativa, cualitativa o mixta analizan profundamente una unidad holística para responder al planteamiento del problema, probar hipótesis y desarrollar alguna teoría”; para el caso de esta investigación, el cambio climático ha generado alteraciones en las plantas debido el estrés hídrico por déficit, lo cual implica cambios en variables como la productividad y por tanto cambios importantes en los sistemas productivos (Hernandez & Fernández , 2006).

- Diseño metodológico

Como lo menciona Hurtado de la Barrera (2000) una investigación de tipo explicativa puede alcanzar varios niveles de precisión, entre los cuales el más apropiado para esta monografía es la elaboración del modelo explicativo o explicación propiamente dicha, el cual consiste en identificar y describir los procesos, las pautas relacionales y la forma de ocurrencia que permite entender cómo y por qué una cierta configuración de eventos, bajo ciertas condiciones, son capaces de generar el evento que se pretende explicar, en nuestro caso la relación que hay entre el estrés hídrico producido en las plantas por el cambio climático, como estrategia de mitigación a los impactos generados por estas condiciones sobre sistemas productivos.

Para poder entender este proceso se va a realizar una revisión bibliográfica del tema de adaptación de las plantas por estrés hídrico por déficit, relacionado con las condiciones generadas por el cambio climático, a través de artículos de revisión, informes, ensayos,

revistas en bases de datos como Google académico, Scopus, Science Direct, Scielo, Agris que desarrollen el tema, a través de ecuaciones de búsqueda por cada objetivo. Además de una selección de la bibliografía que sea más apropiada y a partir de esta identificar casos exitosos que ayuden al desarrollo de la propuesta de mitigación al cambio climático en sistemas productivos.

6. Estrés hídrico en las plantas

¿Qué es?

Todos los organismos requieren de unas condiciones básicas para poder desarrollarse normalmente y cumplir con sus funciones metabólicas mínimas. En el caso de las plantas, estas necesitan de un sustrato para crecer y del cual obtener nutrientes minerales, además de cierta cantidad de agua, oxígeno, CO₂, luz y una temperatura adecuada.

Cuando uno o más de estos requerimientos aumenta o disminuye más allá de sus límites, se puede decir que la planta está bajo estrés. El estrés se produce por condiciones externas que afectan adversamente el crecimiento, desarrollo o productividad de la planta. Puede ser biótico, es decir que puede ser impuesto por otro organismo, o abiótico, aquel que se produce a partir de un exceso o déficit en el medio físico o químico.

Como las plantas son organismos sensibles, deben desarrollar estrategias ante el estrés para que estas condiciones adversas no produzcan daños irreversibles que lleven eventualmente a la muerte. (Buchanan et al, 200)

¿Qué se considera como estrés hídrico?

Dada la definición de estrés, se podría considerar como estrés hídrico la disminución en la disponibilidad de agua, causando un efecto adverso sobre el crecimiento, desarrollo o productividad de la planta. Las sequías, las altas concentraciones de sal en el suelo y las bajas temperaturas, son factores de estrés que disminuyen la cantidad de agua disponible para la planta y que pueden causar daño sobre esta. (Buchanan et al, 200)

7. Resultados

7.1. Primer objetivo específico

Para el objetivo 1 se obtuvieron los siguientes resultados, basados en cada una de las ecuaciones de búsqueda indicadas en cada tabla:

Tabla 1. Resultados Google Académico

Google Académico		
Periodo de tiempo	Ecuación de búsqueda	Total documentos encontrados
1990-2020	TITULO-ABS-KEY (“drought stress” OR “ drought resistance”))	1.010.000
	(TITULO-ABS-KEY (“drought stress”)) AND (TITULO-ABS-KEY (“physiology” OR “morphology”))	263.000
	(TITULO-ABS-KEY (“drought stress”)) AND (TITULO-ABS-KEY (“productive systems”))	19.400

Fuente: Esta investigación.

Tabla 2. Resultados Scopus

Scopus		
Periodo de tiempo	Ecuación de búsqueda	Total documentos encontrados
1990-2020	TITULO-ABS-KEY (“drought stress” OR “ drought resistance”))	11.369
	(TITULO-ABS-KEY (“drought stress”)) AND (TITULO-ABS-KEY (“physiology” OR “morphology”))	8.381
	(TITULO-ABS-KEY (“drought stress”)) AND (TITULO-ABS-KEY (“productive systems”))	101

Fuente: Esta investigación.

Tabla 3. Resultados Science Direct.

Science Direct		
Periodo de tiempo	Ecuación de búsqueda	Total documentos encontrados
1990-2020	TITULO-ABS-KEY (“drought stress” OR “ drought resistance”))	74.652
	(TITULO-ABS-KEY (“drought stress”)) AND (TITULO-ABS-KEY (“physiology” OR “morphology”))	1.847.770
	(TITULO-ABS-KEY (“drought stress”)) AND (TITULO-ABS-KEY (“productive systems”))	9.555

Fuente: Esta investigación.

Tabla 4. Resultados SciELO.

SciELO		
Periodo de tiempo	Ecuación de búsqueda	Total documentos encontrados
1990-2020	TITULO-ABS-KEY (“drought stress” OR “ drought resistance”))	151
	(TITULO-ABS-KEY (“drought stress”)) AND (TITULO-ABS-KEY (598
	(TITULO-ABS-KEY (“drought stress”)) AND (TITULO-ABS-KEY (2

Fuente: Esta investigación.

Tabla 5. Resultados AGRIS.

AGRIS		
Periodo de tiempo	Ecuación de búsqueda	Total documentos encontrados
1990-2020	TITULO-ABS-KEY (“drought stress” OR “ drought resistance”))	5.718
	(TITULO-ABS-KEY (“drought stress”)) AND (TITULO-ABS-KEY (9.980
	(TITULO-ABS-KEY (“drought stress”)) AND (TITULO-ABS-KEY (19

Fuente: Esta investigación.

Del total de búsquedas de cada una de las bases de datos, se eligieron los siguientes documentos, según su relevancia para el desarrollo del primer objetivo.



Figura 1. Estrés hídrico.

Fuente: Esta investigación con datos de (Valladares et al , 2004)

Ante el estrés hídrico caben tres respuestas posibles: escapar, evitarlo o tolerarlo. Mientras todas las estrategias de tolerancia conllevan una limitación mayor o menor del crecimiento, solo la estrategia de ahorro de agua conlleva un crecimiento limitado en el caso de la evitación del estrés. Las especies que derrochan agua son en general más productivas y tienen mecanismos que les permiten una eficaz extracción del agua del sustrato y una elevada conductividad hidráulica interna para abastecer con rapidez toda la parte aérea de la planta. Esto les confiere una gran competitividad, pero no es siempre una estrategia viable en medios secos, particularmente cuando la carencia de agua es crónica. En estas condiciones predominan las especies tolerantes del estrés hídrico (Valladares et al , 2004).

Tabla 6. Mecanismos de protección frente al déficit hídrico reiterado en plantas.

Mecanismos de protección frente al déficit hídrico reiterado en plantas.
<p>Los mecanismos a través de los cuales las plantas hacen frente al déficit hídrico pueden agruparse en dos grandes estrategias: evitar el estrés o tolerarlo. Los mecanismos para evitar el estrés pueden incluir: 1. Escapar de él, como los geófitos que tienen órganos subterráneos llenos de agua que les permiten evitar la sequía; 2. Conservar el agua, lo que le permite a la planta mantener la turgencia celular y 3. Ser capaces de absorber más agua, para lo cual disponen de un mayor sistema radicular o pelos en las hojas.</p> <p>Por otro lado, la estrategia para tolerar el estrés engloba el mantenimiento de la turgencia y la tolerancia a la desecación. El mantenimiento de la turgencia se realiza por medio de un ajuste osmótico. Por otro lado, los mecanismos para tolerar la desecación o pérdida de agua en la célula incluyen el incremento en los niveles de ácido abscísico (ABA) y la activación de mecanismos de fotorrespiración y protección antioxidante (Soriano, 2017).</p> <p>Cierre de estomas: El cierre de estomas es una medida para reducir la pérdida de agua de la planta a corto plazo, sin embargo, si la planta es sometida a un largo periodo de estrés esta medida se torna contraproducente, pues el estoma es también la puerta de entrada del dióxido de carbono y si se mantiene cerrada, se compromete la tasa fotosintética. Esta estrategia hace que la concentración intercelular de CO_2 disminuya haciendo que la asimilación de carbono se inhiba y por lo tanto la capacidad fotosintética de la planta se pierde (Kovalsky París, 2004).</p>

Tabla 6. Mecanismos de protección frente al déficit hídrico reiterado en plantas.

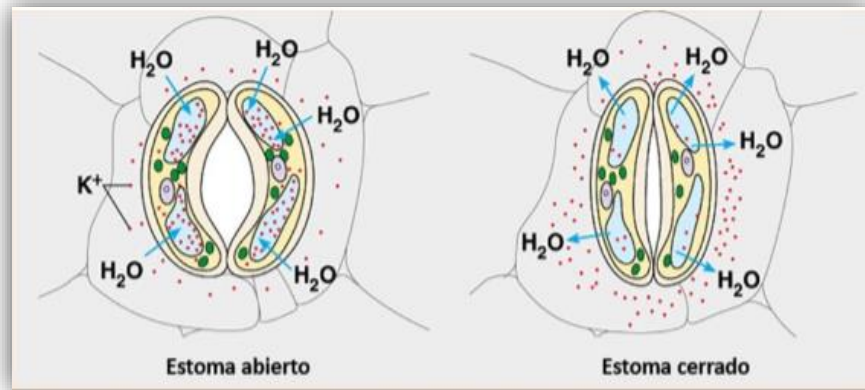


Figura 2. Cierre de estomas.

Fuente: (L. F,2009)



Figura 3. Cierre y apertura de un estoma.

Fuente: www.sciencephoto.com

Para compensar el problema de bajo potencial hídrico del suelo, algunas plantas desarrollan una forma de **ajuste osmótico** para poder mantener alto el gradiente de agua entre la raíz y el sustrato en condiciones donde el agua no es limitante, entran pasivamente solutos las raíces manteniendo una determinada concentración dentro de las células. Sin embargo, en condiciones de déficit de agua, cuando se necesita alcanzar un potencial hídrico en la célula mucho menor al externo, se logra al mantener una concentración de solutos mucho mayor a la normal, acumulándolos, para así poder absorber agua y mantener la célula turgente. Para esto, las plantas pueden absorber activamente solutos del medio, o concentrar en las células de la raíz moléculas producidas internamente (Kovalsky París, 2004).

Tabla 6. Mecanismos de protección frente al déficit hídrico reiterado en plantas.

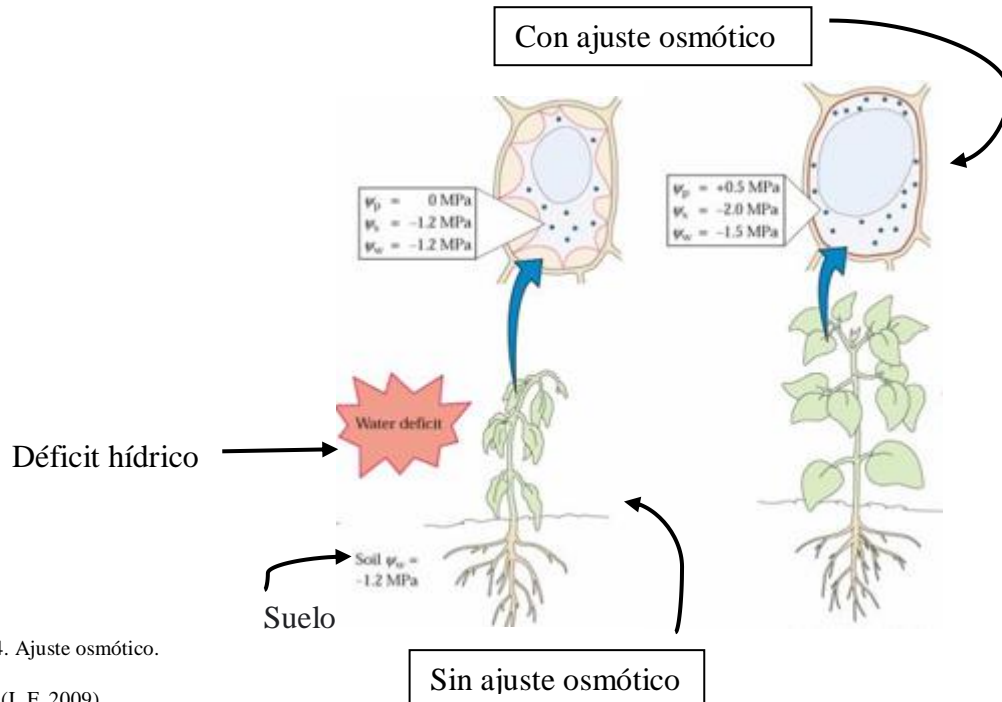


Figura 4. Ajuste osmótico.

Fuente: (L.F, 2009)

ψ_w = Potencial hídrico

ψ_s = Potencial osmótico o potencial de solutos

ψ_p = Presión hidrostática o presión de turgor

Mpa = Megapascals o presión del agua

Control hormonal: Existen cinco grupos principales de hormonas vegetales, las cuales también juegan un papel en el momento en el que la planta se enfrenta a un estrés por déficit hídrico:

Auxinas: Cuando se incrementa la concentración de esta hormona, se induce a la síntesis de etileno. Esta hormona se transporta desde el ápice hacia la base del órgano. Sin embargo, cuando la planta se encuentra en una situación de estrés hídrico, este proceso se inhibe y por lo tanto la síntesis de etileno se ve afectada, reduciendo su transporte (Kovalsky París, 2004).

Tabla 6. Mecanismos de protección frente al déficit hídrico reiterado en plantas.

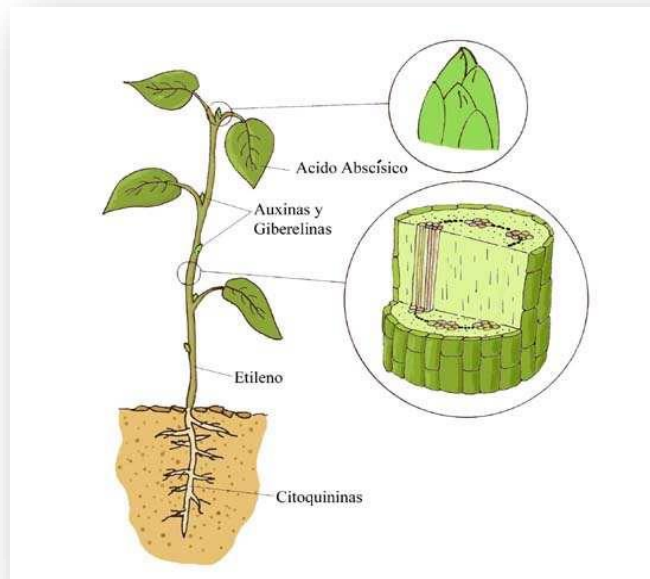


Figura 5. Ubicación de auxinas y giberelinas.

Fuente: www.agriculturers.com

Giberelinas: Su función es estimular la elongación de tallos y hojas mediante la estimulación de la división celular. Se producen en las zonas como ápices y raíces, promoviendo su crecimiento. Cuando la planta está expuesta a bajas temperaturas puede inducir a la producción de flores o germinación de semillas. Sin embargo, una reducción en un 10% del contenido relativo de agua acelerar la tasa de disminución. Por lo tanto, si una planta se encuentra en un ambiente con poca agua, va a disminuir su tasa de crecimiento, dado a que se reduce la estimulación por parte de estas hormonas. (Kovalsky París, 2004)

Etileno: Una de las funciones de esta hormona es la maduración de los frutos. Se ha detectado un aumento en la producción de etileno como respuesta al estrés hídrico. Debido al cierre de estomas en condiciones de estrés, las concentraciones internas de esta hormona aumentan. Por lo tanto, una de las razones por la cual las hojas se caen de la planta se debe a la acción de etileno en altas concentraciones (Kovalsky París, 2004).

Tabla 6. Mecanismos de protección frente al déficit hídrico reiterado en plantas.

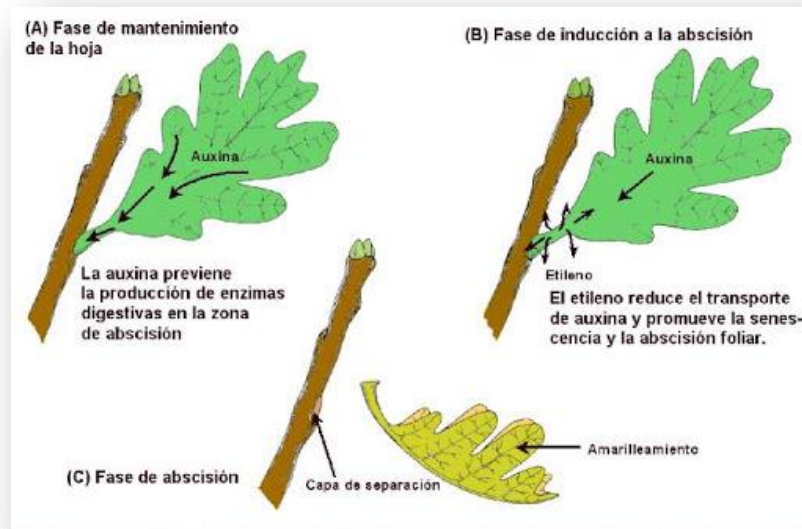


Figura 6. Acción del etileno en las hojas.

Fuente: (Universidad Politécnica de Valencia, 2003)

Citoquininas: Se encuentran en altas concentraciones en lugares de alta tasa de crecimiento como hojas jóvenes y raíces. Entre las funciones que ejerce dentro de la planta están la apertura de estomas y el retardo o la inhibición de la senescencia. Cuando se presenta un estrés hídrico, el movimiento de estas a lo largo de la planta se reduce y como consecuencia, la senescencia de las hojas se acelera y la síntesis proteica se ve inhibida (Kovalsky París, 2004).

Tabla 6. Mecanismos de protección frente al déficit hídrico reiterado en plantas.



Figura 7. Ubicación citoquininas.

Fuente: www.agroactualidad.com

Ácido Abscísico: Se produce en las hojas y raíces, y es transportado por la planta mediante el xilema y floema. Sus funciones principales son las de prevenir la germinación prematura y regular el intercambio de gases y vapor de agua entre la hoja y el medio externo. En condiciones de estrés hídrico, ya habiendo aumentado la concentración de esta en la planta, se produce el cierre de estomas, previniendo que continúe la transpiración, reduciendo la pérdida de agua (Kovalsky París, 2004).

Tabla 6. Mecanismos de protección frente al déficit hídrico reiterado en plantas.

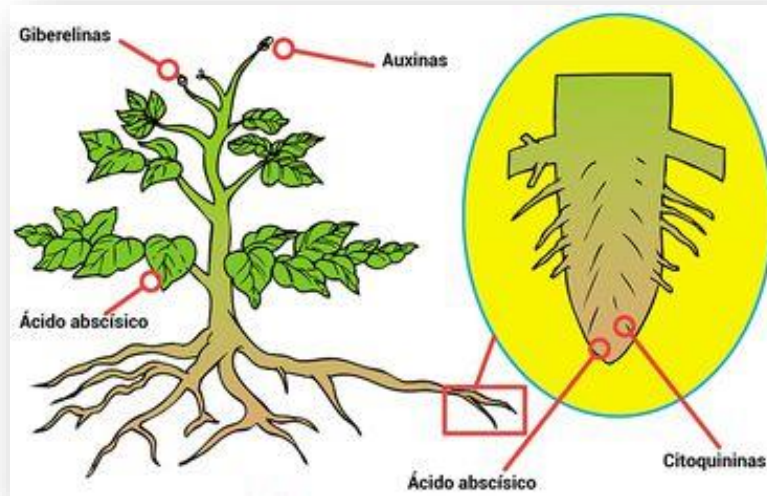


Figura 8. Efecto ácido abscísico.

Fuente: www.agricultures.com

Limitación específica de la expansión foliar: hojas más pequeñas reducen el tamaño del aparato transpiratorio (L.F, 2009).



Figura 9. Expansión foliar

Fuente: www.interempresas.net

Crecimiento radicular: la raíz continúa su desarrollo mientras que la parte aérea deja de crecer por causa del estrés. Así, las plantas son capaces de continuar el desarrollo de sus raíces en búsqueda de agua en zonas más profundas del suelo (L.F, 2009).

Modificación de la expresión de genes: durante el déficit hídrico, diferentes tipos celulares responden incrementando o disminuyendo la expresión de algunos genes (L.F, 2009).

Fuente: Esta investigación con datos de (L.F, 2009) y (Kovalsky París, 2004).

Las condiciones abióticas del medio afectan gravemente el crecimiento y la productividad de las plantas. La sequía, que es el estrés ambiental más importante, perjudica gravemente el crecimiento, desarrollo, producción y rendimiento de las plantas, más que cualquier otro factor ambiental. Los impactos de la sequía incluyen crecimiento, rendimiento, integridad de la membrana, contenido de pigmento, ajuste osmótico de las relaciones del agua y actividad fotosintética.

La aclimatación de las plantas al déficit hídrico es el resultado de varios eventos, que conducen a cambios adaptativos en el crecimiento de las plantas y procesos físico-bioquímicos, como cambios en la estructura de la planta, tasa de crecimiento, potencial osmótico tisular y defensas antioxidantes.

Tabla 7. Respuestas morfológicas, fisiológicas y bioquímicas de las plantas al estrés por sequía.

Tipo de respuesta	Morfológica	Fisiológica	Bioquímica
Crecimiento	X		
Rendimiento	X		
Raíces		X	
Actividad fotosintética		X	
Contenido de clorofila		X	
Acumulación de osmolitos		X	
Especies reactivas de oxígeno			X
Enzimas antioxidantes			X

Fuente: Esta investigación.

Tabla 8. Respuestas morfológicas, fisiológicas y bioquímicas de las plantas.

Respuestas morfológicas
Crecimiento
El primer y principal efecto de la sequía es la germinación deteriorada y el establecimiento deficiente del rodal. El crecimiento es el resultado de la producción de células hijas por divisiones de células meristemáticas y la posterior expansión masiva de las células jóvenes. Bajo una deficiencia severa de agua, el alargamiento celular de las plantas superiores puede inhibirse mediante la interrupción del flujo de agua desde el xilema a las células en elongaciones circundantes. La sequía causó mitosis deteriorada; El alargamiento y expansión celular dio como resultado una reducción de los rasgos de crecimiento y rendimiento. Los déficits hídricos reducen el número de hojas por planta y el tamaño de las hojas individuales, la longevidad de las hojas al disminuir el potencial hídrico del suelo. (Anjum et al., 2011).
La expansión del área foliar depende de la turgencia foliar, la temperatura y el suministro de asimilación para el crecimiento. La reducción del área foliar inducida por la sequía se atribuye a la supresión de la expansión foliar mediante la reducción de la fotosíntesis

Tabla 8. Respuestas morfológicas, fisiológicas y bioquímicas de las plantas.

Rendimiento
El rendimiento del grano es el resultado de la expresión y asociación de varios componentes del crecimiento de las plantas. La deficiencia de agua conduce a una severa disminución en los rasgos de rendimiento de las plantas de cultivo, probablemente al alterar las propiedades de intercambio de gases de las hojas que no solo limitaron el tamaño de los tejidos de origen y sumidero, sino que también se altera el floema, la translocación de asimilación y la distribución de materia seca (Anjum et al., 2011).
Respuestas fisiológicas
Raíces
<p>Generalmente, cuando la disponibilidad de agua es limitada, la proporción raíz: brote de las plantas aumenta porque las raíces son menos sensibles que los brotes a la inhibición del crecimiento por los bajos potenciales hídricos.</p> <p>En condiciones de estrés por sequía, las raíces inducen una cascada de señales a los brotes a través del xilema provocando cambios fisiológicos que finalmente determinan el nivel de adaptación al estrés. El ácido abscísico (ABA), las citoquininas, el etileno, el malato y otros factores no identificados se han implicado en la señalización raíz-brote. Esta señalización de raíz a hoja inducida por la sequía a través de la corriente de transpiración da como resultado el cierre de los estomas, que es una adaptación importante al suministro limitado de agua en el campo. ABA promueve la salida de iones K⁺ de las células de guarda, lo que da como resultado la pérdida de la presión de turgencia que conduce al cierre de los estomas. Se ha demostrado que la deshidratación de las plantas causa un aumento del nivel de ABA hasta 50 veces debido a la pérdida de turgencia celular o perturbación de la membrana célula (Anjum et al., 2011).</p>
Actividad fotosintética
El estrés por sequía obstaculizó gravemente los parámetros de intercambio de gases de las plantas de cultivo y esto podría deberse a la disminución de la expansión de las hojas, la maquinaria fotosintética deficiente, la senescencia prematura de las hojas, la oxidación de los lípidos del cloroplasto y los cambios en la estructura de los pigmentos y las proteínas (Anjum et al., 2011).
Contenido de clorofila
La clorofila es uno de los principales componentes del cloroplasto para la fotosíntesis, y el contenido relativo de clorofila tiene una relación positiva con la tasa fotosintética. La disminución del contenido de clorofila bajo estrés por sequía se ha considerado un síntoma típico del estrés oxidativo y puede ser el resultado de la fotooxidación del pigmento y la degradación de la clorofila. Los pigmentos fotosintéticos son importantes para las plantas principalmente para cosechar luz y producir poderes reductores (Anjum et al., 2011).
Acumulación de osmolitos
Las plantas acumulan diferentes tipos de solutos orgánicos e inorgánicos en el citosol para reducir el potencial osmótico, manteniendo así la turgencia celular. En condiciones de sequía, el mantenimiento de la turgencia foliar también puede lograrse mediante el ajuste osmótico en respuesta a la acumulación de prolina, sacarosa, carbohidratos solubles y otros

<p>Tabla 8. Respuestas morfológicas, fisiológicas y bioquímicas de las plantas.</p> <p>solutos en el citoplasma, lo que mejora la absorción de agua del suelo seco. El proceso de acumulación de tales solutos bajo estrés por sequía se conoce como ajuste osmótico que depende en gran medida de la tasa de estrés hídrico de la planta (Anjum et al., 2011).</p>
<p>Respuestas bioquímicas</p>
<p>Especies reactivas de oxígeno (ROS)</p> <p>La generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) es una de las primeras respuestas bioquímicas de las células eucariotas al estrés biótico y abiótico. La producción de ROS en las plantas, conocida como explosión oxidativa, es un evento temprano de la respuesta de defensa de la planta al estrés hídrico y actúa como un masajeador secundario para desencadenar una reacción de defensa posterior en las plantas (Anjum et al., 2011).</p>
<p>Enzimas antioxidantes</p> <p>Existe un sistema defensivo en las plantas, es decir, las plantas tienen un sistema de limpieza interno catalizado por enzimas protectoras, que es lo suficientemente fino y elaborado para evitar lesiones del oxígeno activo, garantizando así la función celular normal.</p> <p>El equilibrio entre la producción de ROS y las actividades de la enzima antioxidante determina si se producirán señales oxidativas y / o daños. Para minimizar las afecciones del estrés oxidativo, las plantas han desarrollado un complejo sistema antioxidante enzimático y no enzimático, como los antioxidantes de baja masa molécula (Anjum et al., 2011).</p>

Fuente: Esta investigación con datos de (Anjum et al., 2011).

7.2. Segundo objetivo específico

Como se mencionó en el desarrollo del primero objetivo, los sistemas productivos utilizados, son aquellos que se adaptan a Colombia, como los policultivos, cultivos multiestrato y monocultivos.

Una de las definiciones de sistemas más conocidas: un sistema es un conjunto de elementos interrelacionados que cumplen una función (Carlos Alberto Ossa Ossa, 2017).

Por otro lado, los sistemas productivos, pueden definirse como explotaciones agrícolas individuales con recursos básicos, medios familiares de sustento y limitaciones en general similares, los policultivos son entendidos como sistema de cultivos agrícolas que producen simultáneamente cultivos diferentes en una misma explotación. Estos tienden a tener una mayor resistencia y estabilidad de la productividad durante una sequía, respecto a los monocultivos (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, n.d.). Por otro lado, se entiende como cultivo multiestrato aquel que se acerca o intenta acercarse a la dinámica y estructura de los bosques naturales. En estos se combinan las especies nativas de una zona con otras especies que son aptas a dichas condiciones y que a la vez puedan ser aprovechadas por las comunidades. Se han asociado cultivos como el arroz, maíz, banano, cacao, cítrico, café con otras especies frutales, maderables, palmeras y especies utilizadas para poda. De esta manera, se busca producir sin afectar el suelo (Weinert & Yana, 2001). Por último, se conoce como monocultivo a la práctica de plantar grandes extensiones de tierra con cultivos de una sola especie, en los cuales se usan los mismos patrones de cultivo, riego, fertilización y recolección; lo que resulta en la

producción de grandes cantidades de un mismo producto a un bajo costo (Facultad de Ingeniería Universidad del Valle, 2015).

A continuación, se muestra la segunda parte de los resultados que se obtuvieron de las búsquedas que se realizaron en el primer objetivo, en este caso se muestran las respuestas de aquellas plantas que pueden ser cultivables en Colombia y que se encuentren o puedan ser usadas en algunos de los tres sistemas productivos anteriormente mencionados.

7.2.1. Respuestas en plantas cultivables

7.2.1.1 Cítricos

Muchos autores han informado que la respuesta de los árboles cítricos al déficit hídrico depende, principalmente, de la fenología del cultivo y los efectos que se han observado están estrechamente relacionados con el momento, la duración, el estado fisiológico del cultivo, la calidad del agua de irrigación, el genotipo y el grado de estrés impuesto al cultivo. (Vázquez, Rodríguez, Hernández, & Grandal, 2017)

Se estudió el comportamiento de los patrones lima ‘Rangpur’ y citrúmelo ‘Swingle’ en árboles de naranjo ‘Valencia’ crecidos en condiciones de déficit hídrico y se encontró que el estrés redujo el potencial hídrico foliar y causó limitación en la difusión de la fotosíntesis en ambos patrones. Sin embargo, los árboles injertados sobre el patrón lima ‘Rangpur’ presentaron un crecimiento radical acelerado, un mantenimiento de carbohidratos totales y un gran desplazamiento en la partición de los carbohidratos, con las raíces acumulando carbohidratos en condiciones de déficit hídrico (Vázquez et al., 2017).

7.2.1.2 Café

La investigación se realizó en plantaciones de cafeto (*Coffea arabica*. L.) var. Caturra rojo, en fase de producción de 12 años.

Tabla 9. Resultados tratamiento del cafeto.

Tratamiento	ET	ET _{max}	ET/ET _{max}	R	R _{max}	R/R _{max}	(1-ET/ET _{max})	(1-R/R _{max})	K _y
T2	472,7	1197,3	0,39	2,37	2,83	0,79	0,61	0,33	0,55
T3	649,1	1112,3	0,58	2,24	2,83	0,83	0,42	0,24	0,58
T4	996,6	1177,0	0,85	2,62	2,83	0,95	0,15	0,05	0,32
T5	910,4	1199,6	0,76	2,4	2,83	0,91	0,24	0,09	0,38
T6	504,2	1120,5	0,45	1,56	2,83	0,55	0,55	0,45	0,82

ET= Evapotranspiración real (mm), ET_{max} = Evapotranspiración máxima (mm), R = Rendimiento real (t*ha), R_{max} = Rendimiento máximo (t*ha), (1- ET/ET_{max}) = Déficit relativo de evapotranspiración, (1-R/R_{max}) = Disminución relativa de rendimiento, K_y = Factor de sensibilidad al déficit hídrico del cafeto.

Fuente: (González-Robaina, Cisneros-zayas, & Montilla, 2017)

Se muestran los valores medios del factor de sensibilidad al déficit hídrico (K_y) para diferentes fases de desarrollo del café. Se puede observar que los valores medios de K_y en los tratamientos 4 y 5, sometidos a déficit hídrico en las fases de maduración-cosecha y vegetativa, respectivamente, fueron los más bajos, donde el déficit hídrico tuvo poco efecto sobre el rendimiento del café (González-Robaina et al., 2017).

La reducción relativa del rendimiento fue más acentuada en la fase de fructificación-desarrollo del fruto (T3) con un valor de 0,58, similar al 0,55 obtenido en la fase de floración-fructificación (T2), aunque los valores de K_y están por debajo de uno, estas son las fases de mayor sensibilidad al déficit hídrico. El valor promedio del factor de sensibilidad al déficit hídrico K_y en todas las fases fue de 0,52. (González-Robaina et al., 2017)

El valor de K_y en el tratamiento con déficit hídrico en todas las fases (T6) fue el mayor en relación con el resto de los tratamientos (0,82). Este valor de K_y sugiere que para un déficit hídrico planificado de un 50%, se puede esperar una pérdida relativa de rendimiento de un 41%. (González-Robaina et al., 2017).

En conclusión, se encontró que los valores de K_y del café, en todos los tratamientos estudiados, fueron inferiores a 1, indicando que el café es tolerante al déficit hídrico y se recupera parcialmente del estrés, además la sensibilidad al déficit hídrico (K_y) en las diferentes fases de desarrollo del café varía en el siguiente orden: déficit en todas las fases > déficit en la fase de fructificación desarrollo del fruto > déficit en la fase de floración-fructificación > déficit en la fase vegetativa > déficit en la fase de maduración-cosecha. (González-Robaina et al., 2017)

7.2.1.3 Cacao

La investigación fue realizada en plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en condición de vivero durante seis meses. Se evaluó el comportamiento de plántulas de cacao frente al estrés hídrico y sus respuestas frente a este.

Tabla 10. Resultados plántulas de cacao.

	Condiciones normales	Condiciones de sequía
Número de hojas	58	37
Área radicular	94,61 cm ²	91,68 cm ²
Área foliar	826,35 cm ²	718,88 cm ²
Altura de las plantas	63,61 cm	52,46 cm

Fuente: esta investigación con datos de (Gonzalo Torres Pezo, 2018).

7.2.1.4 Tomate

La mayoría de los cultivos, incluyendo el tomate (*Solanum lycopersium* L.), son sensibles al estrés hídrico en diferentes fases de desarrollo, desde la germinación hasta el cuajado de los frutos. En cada etapa la planta experimenta cambios a nivel molecular, morfológico, fisiológico y celular. Las respuestas de la planta dependen del genotipo y el estadio de desarrollo de esta en el momento del estrés, de la duración y la severidad del estrés y de los factores ambientales que lo provoquen (Florido & Bao, 2014).

Tabla 11. Respuestas del tomate ante estrés hídrico.

<p>Crecimiento radicular: Se plantea que este es uno de los sitios primarios de percepción del daño. Las raíces son un órgano clave para la adaptación a la sequía. En muchas circunstancias la sensibilidad de las raíces al estrés limita la productividad de las plantas. La planta necesita un sistema radical con una arquitectura (densidad, tamaño, proliferación) que responda a la demanda de agua de los órganos aéreos. En el cultivo del tomate, se ha detectado que una elongación de las raíces rápida y temprana es un indicador importante de resistencia al estrés (Florido & Bao, 2014).</p>
<p>En tomate, se han informado, además, disminuciones en el número de flores y frutos, en la masa promedio de los frutos, las masas fresca y seca de la planta y del porcentaje de fructificación conjuntamente con el potencial hídrico de la hoja y el uso eficiente de agua (Florido & Bao, 2014).</p>
<p>Ajuste osmótico se produce en las plantas a través de la biosíntesis de osmolitos y por la acumulación de iones, fundamentalmente K^+ y NO_3^-. La acumulación de estos elementos protege a las plantas de tomate de los efectos causados por el estrés hídrico (Florido & Bao, 2014).</p>

Fuente: Esta investigación con datos de (Florido & Bao, 2014).

7.2.1.5 Papaya

Las plantas se sometieron a 21 días de supresión del riego y posteriormente a un periodo de recuperación durante 15 días, donde el suelo volvió a tener un nivel de humedad similar al control.

El contenido de humedad presente en el suelo en los tratamientos estudiados se muestra en la figura 11. Se puede observar la pérdida de agua mediante medios naturales como la evaporación y transpiración durante el tiempo de exposición al estrés, siendo más considerable al final de este (92 días después de la siembra, DDS). Luego de restablecer el riego se observa una rápida recuperación en el contenido volumétrico de agua en el suelo, tomando valores cercanos al control (Hernández et al., 2014).

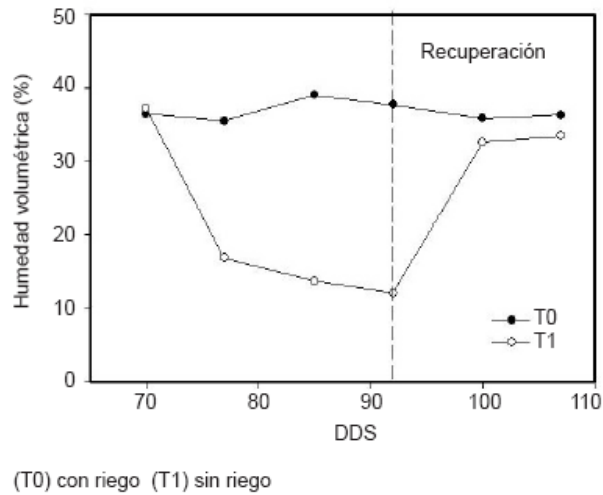


Figura 10. Dinámica de la humedad en el suelo durante el periodo experimental.

Fuente: (Hernández et al., 2014).

En ambos tratamientos, las plantas presentaron un incremento de la altura en el período de tiempo de la investigación, respondiendo a la fase de crecimiento vegetativo; sin embargo, las plantas sometidas a estrés mostraron una reducción y mostraron síntomas de recuperar la intensidad en el crecimiento, a partir de que la humedad del suelo volvió a ser o fue parecida a la del control. No obstante, las plantas con restricción hídrica se vieron afectadas en su altura, demostrando que la planta es incapaz de recuperar su condición normal.

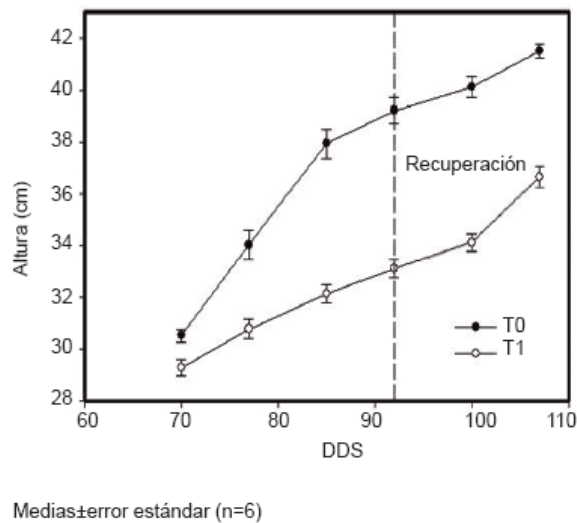


Figura 11. Desarrollo de la altura alcanzada por las plantas en los tratamientos.

Con riego (T0) y sin riego (T1)

Fuente: (Hernández et al., 2014).

El impacto de dicha supresión del riego resultó en una reducción de hasta un 15% en el crecimiento respecto al control a los 12 días de suprimir el riego; sin embargo, como se mencionó anteriormente se aprecia una tendencia a la recuperación, donde se puede observar una reducción de la afectación hasta un 12%, luego de que es restablecido el riego.

Se encontró que la deficiencia hídrica en el suelo tuvo un impacto en el desarrollo foliar de las plantas, encontrando diferencias significativas a partir de los siete días de imposición del estrés en las plantas. este comportamiento es similar durante el desarrollo del estrés, alcanzando valores parecidos al control en el último momento de la recuperación, lo cual indica que las plantas de papaya pueden llegar a recuperar su superficie foliar después de un período de estrés, al igual que en el caso de la altura (Hernández et al., 2014).

Se pudo observar también que el estrés provocó un aumento en la acumulación de masa seca de la raíz en comparación a la parte aérea, alcanzando valores superiores a los del control.

El área foliar específica (AFE) tuvo una tendencia a disminuir tanto en el control como en aquellas plantas sometidas a estrés. Por lo tanto ambos tratamientos respondieron de manera similar (Hernández et al., 2014).

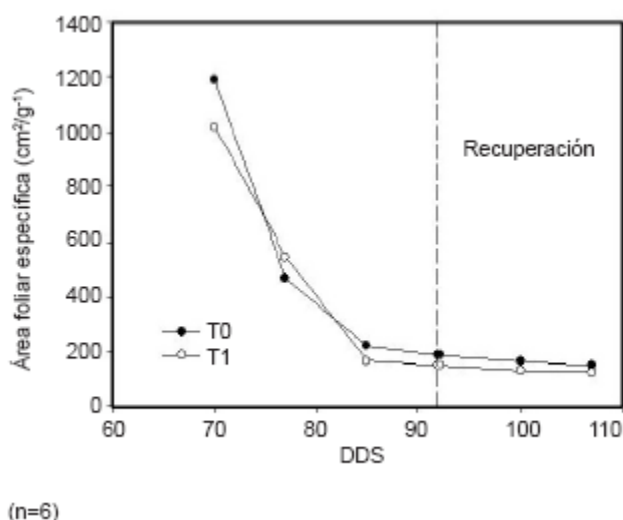


Figura 12. Dinámica del área foliar específica (AFE).

Con riego (T0) y sin riego (T1), periodo de estrés y recuperación.

Fuente: (Hernández et al., 2014).

Las afectaciones en el contenido de clorofila total en plantas de papaya son más severas a partir de los 15 días de suspendido el abastecimiento de agua. Estos posibles daños en el aparato fotosintético pueden haber sido una de las causas de la menor acumulación de biomasa en el tratamiento sin suministro hídrico (Hernández et al., 2014).

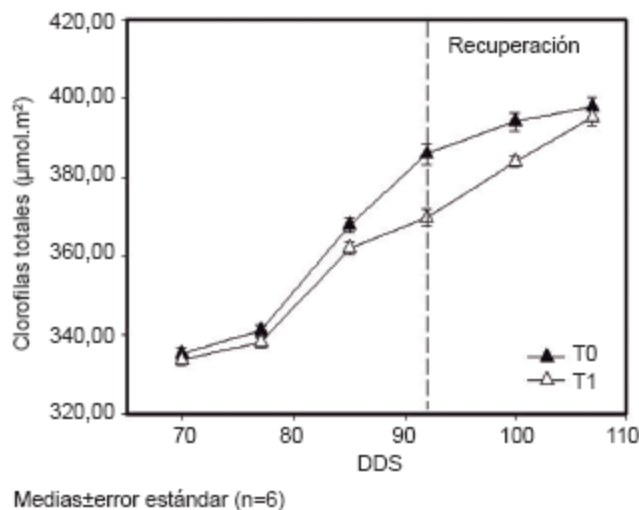


Figura 13. Contenido de clorofilas totales en los tratamientos.

(T0): Tratamientos con riego

(T1): Tratamientos sin riego

Fuente: (Hernández et al., 2014).

7.2.1.6 Banano

La investigación se realizó con 25 plantas de banano cv. 'Pineo Gigante' (Musa AAA) regeneradas in vitro a partir de yemas irradiadas con 30Gy de Rayos X, las cuales fueron seleccionadas por presentar tolerancia a condiciones simuladas de estrés hídrico. Estas Se compararon con otras 25 plantas regeneradas in vitro a partir de yemas no irradiadas (plantas control) (Salazar et al., 2014).

Se encontró que la tasa de fotosíntesis neta de las plantas regeneradas fue superior a la exhibida por las plantas control. En ambos casos se observó que la tasa de fotosíntesis se incrementó las primeras 24 horas posteriores a la supresión del riego, lo cual fue interpretado como una respuesta adaptativa inicial ante las condiciones de estrés. Las plantas control sufrieron a partir de ese momento un descenso brusco en la tasa de fotosíntesis neta, la cual continuó decreciendo durante el tiempo en que se realizó la investigación (Salazar et al., 2014).

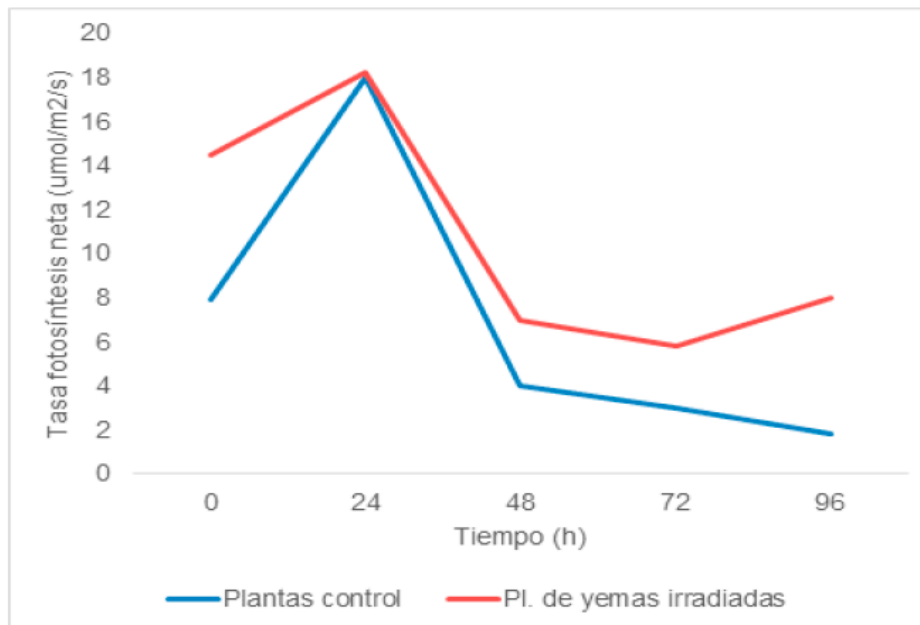


Figura 14. Tasa de fotosíntesis neta en plantas de banano cv. 'Pineo Gigante' (Musa AAA) sometidas a condiciones simuladas de estrés hídrico.

Fuente: (Salazar et al., 2014).

En las plantas provenientes de yemas irradiadas, se observó una disminución de la tasa de fotosíntesis neta hasta las 48 horas, menos drástica hasta las 72 h y posteriormente exhibieron un aumento en esta variable. El efecto se caracterizó por una declinación rápida de la tasa de fotosíntesis en las primeras horas bajo estrés (Salazar et al., 2014).

Respecto a la actividad respiratoria, la tendencia de las plantas control fue la de incrementar levemente la tasa de transpiración durante las primeras 24 horas, y luego se presentó una disminución en este parámetro similar al observado en la tasa fotosintética neta. Las plantas regeneradas presentaron valores de menores que las plantas control, los valores se mantuvieron bajos, con una tasa de transpiración foliar relativamente constante a partir de las 72 horas de exposición al estrés hídrico (Salazar et al., 2014).

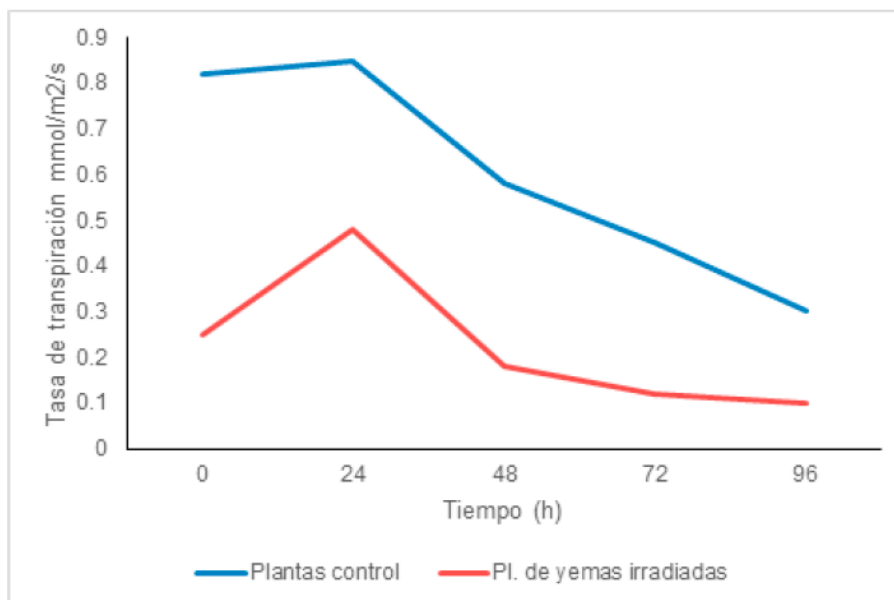


Figura 15. Efecto de la exposición a condiciones de estrés hídrico sobre la tasa de transpiración foliar de banano cv. 'Pineo Gigante' (Musa AAA).

Fuente: (Salazar et al., 2014).

Se observó que las plantas control tuvieron una tendencia a incrementar la conductancia estomática de manera inmediata al momento de imponer la condición de estrés hídrica para luego tener una ligera disminución pasado 48 horas. Por otro lado, en las plantas provenientes de yemas irradiadas se observó una disminución de la conductancia estomática a las 24 horas, y una reducción drástica hacia las 48 horas bajo estrés (Figura 3). Se ha demostrado que las condiciones de estrés hídrico tienden a inducir una disminución en los parámetros de intercambio gaseoso, como estrategia de disminución de la pérdida de agua, y por consecuencia se afecta la fotosíntesis (Salazar et al., 2014).

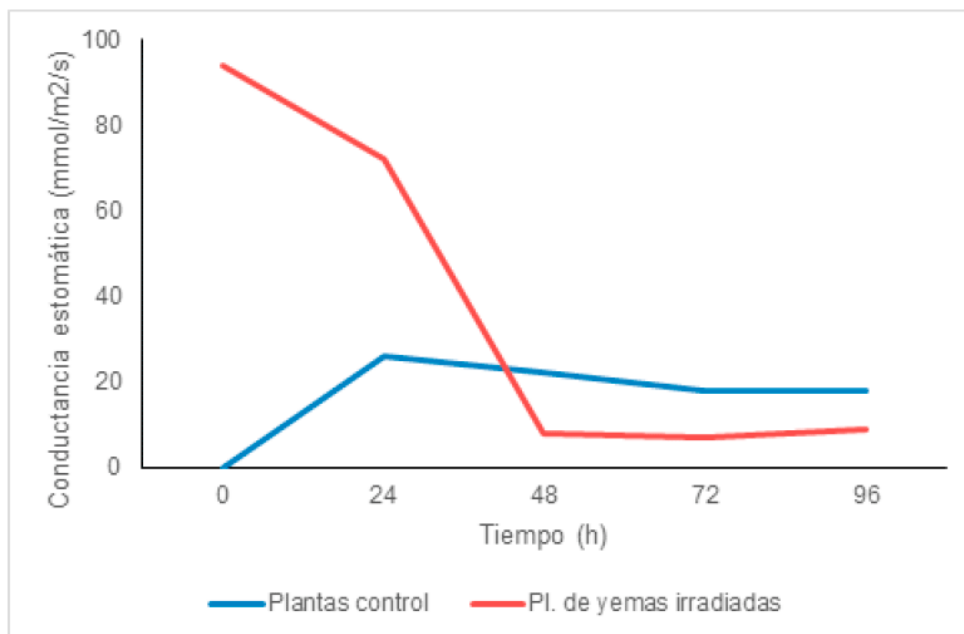


Figura 16. Efecto de la exposición a condiciones de estrés hídrico sobre la conductancia estomática de plantas de banano cv. 'Pineo Gigante' (Musa AAA).

Fuente: (Salazar et al., 2014).

Al hacer una comparación entre los tres parámetros antes mencionados se observa que las plantas provenientes de yemas irradiadas redujeron la capacidad de pérdida de agua, pero fueron capaces de mantener una tasa de fotosíntesis neta mayor que las plantas de control. Al final de la investigación y del periodo de tiempo bajo condiciones de estrés, se observó una recuperación tanto de la fotosíntesis neta como de la conductancia estomática, lo que pudiera explicar la tolerancia a estrés hídrico, observada en estas plantas, desde el punto de vista fotosintético (Salazar et al., 2014).

7.2.1.7 Piña

Se seleccionaron 400 plántulas de cinco meses en aclimatación, las cuales fueron separadas en dos grupos de 200 individuos. El primer grupo fue sometido a estrés hídrico durante 30 días y posterior a esto se reestablecieron las condiciones de humedad, en cuanto al segundo grupo se mantuvo todo el tiempo en condiciones normales de humedad. Las evaluaciones de su evolución se realizaron a los 15, 30 y 45 días de iniciado el experimento (Carlos Rodríguez, R., & Rodríguez, R. 2018).



Figura 17. Plántulas de piña.

Fuente: (Carlos Rodríguez, R., & Rodríguez, R. 2018).

Determinación de indicadores morfológicos. Se tomaron 30 plantas como referencia en cada tratamiento y momento de evaluación, y se evaluaron las siguientes variables: altura de la planta, número de hojas totalmente expandidas y funcionales, longitud de la hoja.

En los primeros 15 días no existieron diferencias significativas entre grupos en cuanto al crecimiento de la planta, a partir de ese momento el crecimiento de las plántulas con riego fue superior a las que estaban sometidas al estrés por déficit hídrico. Dicho estrés afectó el crecimiento de las hojas de las plántulas sin riego en los primeros 30 días, pero una vez que este grupo comenzó a regarse nuevamente el crecimiento fue continuo (Carlos Rodríguez, R., & Rodríguez, R. 2018).

Respecto al ancho de la hoja y número de estas, se observó que, para el primer parámetro, existieron diferencias significativas a los 15 y 30 días entre grupos. Las plántulas sin riego tuvieron mayores valores respecto a las plántulas con riego. A partir de los 30 días se aplicó riego al grupo que estaba sometido a estrés (120 ml/planta), lo cual provocó que disminuyera el ancho de la hoja. En cuanto a la emisión de hojas, durante los primeros 30 días el déficit hídrico afectó el crecimiento de nuevas hojas en las plántulas sometidas a estrés hídrico, no siendo así en el grupo que no estaba sometido a estas condiciones. A partir de los 45 días se observó un incremento en el número de hojas, lo que indicó una recuperación de las plántulas a partir del inicio del riego (Carlos Rodríguez, R., & Rodríguez, R. 2018).

7.3. Tercer objetivo específico

A continuación, se muestran algunas de las prácticas y estrategias que han desarrollado pequeños agricultores y que se identifican como exitosas, para disminuir la vulnerabilidad frente a la variabilidad climática. La cual se entienden como los cambios en los valores promedios del clima en distintas escalas temporales y espaciales (Poveda, 2004). Para esto se utilizaron al igual que en el primer objetivo ecuaciones que son usadas para realizar las búsquedas en las bases de datos mencionadas en el primer objetivo.

En Colombia la variabilidad climática depende del fenómeno de El Niño (aguas más cálidas que lo normal en el Pacífico tropical) y de La Niña (aguas más frías que lo normal en el Pacífico tropical). Estos generan cambios de presión atmosférica en el Pacífico tropical (conocidos como la Oscilación del Sur), lo que altera la circulación en la atmósfera tropical e induce anomalías climáticas a diferentes regiones del planeta (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, n.d.).

Tabla 12. Resultados Google Académico tercer objetivo.

Google Académico		
Periodo de tiempo	Ecuación de búsqueda	Total documentos encontrados
1990-2020	(TÍTULO-ABS-KEY ("Climate change") AND (TÍTULO-ABS-KEY ("agriculture in Colombia)))	16.300

Fuente: Esta investigación.

Tabla 13. Resultados Scopus tercer objetivo.

Scopus		
Periodo de tiempo	Ecuación de búsqueda	Total documentos encontrados
1990-2020	(TÍTULO-ABS-KEY ("Climate change") AND (TÍTULO-ABS-KEY ("agriculture in Colombia)))	99

Fuente: Esta investigación.

Tabla 14. Resultados ScienceDirect tercer objetivo.

ScienceDirect		
Periodo de tiempo	Ecuación de búsqueda	Total documentos encontrados
1990-2020	(TÍTULO-ABS-KEY ("Climate change") AND (TÍTULO-ABS-KEY ("agriculture in Colombia)))	7744

Fuente: Esta investigación.

Tabla 15. Resultados Scielo tercer objetivo.

Scielo		
Periodo de tiempo	Ecuación de búsqueda	Total documentos encontrados
1990-2020	(TÍTULO-ABS-KEY ("Climate change") AND (TÍTULO-ABS-KEY ("agriculture in Colombia)))	17

Fuente: Esta investigación.

Tabla 16.Resultados Agris tercer objetivo.

Agris		
Periodo de tiempo	Ecuación de búsqueda	Total documentos encontrados
1990-2020	(TÍTULO-ABS-KEY ("Climate change") AND (TÍTULO-ABS-KEY ("agriculture in Colombia)))	22

Fuente: Esta investigación.

7.3.1. Adaptación a la variabilidad climática entre los caficultores de las cuencas de los ríos Porce y Chinchiná, Colombia.

A continuación, se presentan algunas estrategias agrícolas y ecológicas, utilizadas por los caficultores de las dos cuencas estudiadas para enfrentar la variabilidad climática y garantizar tanto la producción cafetera como la reproducción de sus familias (Turbay et al., 2014).

Tabla 17.Estrategias de adaptación caficultores Porce y Chinchiná.

Estrategias de adaptación		Efectos de las estrategias de adaptación actuales
Anteriores	Actuales	
Agrícolas y ecológicas		
Monocultivo a plena exposición solar Suelos desnudos por el continuo desyerbe con herbicidas y con herramientas como el azadón Cultivo de café a un solo eje Utilización exclusiva de fertilizantes químicos	Agroforestería	Regula la temperatura del suelo y del ambiente. Protege mejor el suelo porque las hojas le aportan materia orgánica. Ciclaje de nutrientes porque los que están a mayores profundidades, no disponibles para el café, son bombeados por los árboles a través de las hojas que caen al suelo. Mayor protección del cultivo frente a tormentas, vendavales, etc. porque las estratas superiores de los árboles mitigan el impacto de los eventos climáticos extremos. Mejora el estado sanitario debido al confort de la planta. Aumenta la calidad en taza del café. Incrementa los ingresos económicos por la venta de otros productos.
	Variedades resistentes a la roya (<i>Hemileia vastatrix</i>),	Disminuye la presencia de la enfermedad gracias a las variedades resistentes (especialmente Castillo Rosario).
	Coberturas vegetales	Protegen el suelo frente a la erosión hídrica y aumentan la retención de nutrientes. Aportan materia orgánica al suelo, lo que mejora sus propiedades físicas, químicas, biológicas e hidrológicas y provoca un mejor estado nutricional de la planta. Favorecen la biología del suelo. Mejoran la retención y filtración del agua en el suelo.
	Abonos orgánicos y uso de microorganismos fijadores de nutrientes	Ayudan a una mejor nutrición de la planta y esto la hace más resiliente frente a la variabilidad en el clima. Potencian la utilización de la mano de obra y de los propios recursos de los agricultores. Mejoran la retención y filtración del agua en el suelo. Incrementan actividad biológica del suelo. Regulan el ph en el suelo. Mejoran la absorción de nutrientes.

Poca implementación de prácticas culturales	Asociación de cultivos	Mejor utilización del terreno, aprovechando otros productos mientras crece el café como cultivo principal. Generan ingresos adicionales por la venta de productos diferentes al café, lo que permite una mayor estabilidad económica. Mitigan las pérdidas cuando se da una disminución severa en la producción del café como cultivo principal. Favorece la seguridad alimentaria de la familia.
Tala de cursos y nacimientos de agua	Fertilización adecuada y prácticas culturales	Incrementan la capacidad de la planta para soportar la variabilidad climática.
	Cultivo de café a dos ejes	Producción más constante en el tiempo, ya que cada eje tiene una producción alternada y en caso de un gran impacto de variabilidad climática, el porcentaje de pérdida de la producción se reduce al 50%, propia al eje de producción en ese momento.
	Protección de cursos y nacimientos de agua	Mitiga el desbordamiento de los cauces de agua y deslizamientos de tierra.
	Producción escalonada (lotes de diferentes edades en la finca)	Producción más constante en el tiempo, ya que la renovación del café se hace por lotes. Los lotes en producción permiten subsidiar los costos de los lotes que están en periodo de crecimiento o establecimiento. Mayor posibilidad de emplear mano de obra familiar, lo que disminuye la necesidad de efectivo para el pago en mano de obra externa. Disminución al riesgo climático porque no toda la producción está centrada en un solo lote o edad.

Fuente: (Turbay et al., 2014)

7.3.2. Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas.

1) Sistemas de cultivos múltiples o policultivos

Los policultivos exhiben una mayor estabilidad y menos declinaciones de la productividad durante una sequía que en el caso de monocultivos. Un estudio realizado por Natarajan y Willey, llamado “*The effects of water stress on yield advantages of intercropping systems*” en 1968. Examinaron el efecto de la sequía en producciones con policultivos mediante tratamientos del stress hídrico con cultivos intercalados de sorgo (*Sorghum bicolor*), maní (*Arachis spp.*) y mijo (*Panicum spp.*). Estos presentaron sobreproducción constante en cinco niveles de disponibilidad de humedad, en un rango desde 297 a 584 milímetros de agua aplicados en la época de siembra(Altieri & Nicholls, 2008).

Sorprendentemente, la tasa de sobreproducción se vio actualmente incrementada con stress hídrico, tal que las diferencias relativas en productividad entre los monocultivos y policultivos se acentuaron más a medida que el stress incrementaba. Los policultivos exhibieron una mayor estabilidad y menos declinaciones de la productividad durante la sequía. Estos tipos de estudios ecológicos sugieren que comunidades más diversas de plantas son más resistentes al disturbio y más resilientes a las perturbaciones ambientales(Altieri & Nicholls, 2008).

2) Uso de la diversidad genética local

Además de adoptar una estrategia de diversidad interespecífica, muchos agricultores también explotan la diversidad intraespecífica mediante la siembra al mismo tiempo y en el mismo campo, de diversas variedades del mismo cultivo(Altieri & Nicholls, 2008).

Hay variedades que tienen rasgos morfológicos y fisiológicos específicos que las hacen resistentes a los ambientes secos. Entre las variables medidas que demostraron condicionar una tendencia general de mayor resistencia a la sequía, solamente el ajuste osmótico bajo stress estuvo correlacionado con la precipitación media, indicando un mayor ajuste osmótico en regiones más secas. Aquellas plantas con una mayor capacidad para el ajuste osmótico se caracterizan por ser plantas más pequeñas con altas tasas de transpiración y bajas tasas de senescencia en hojas bajo stress(Altieri & Nicholls, 2008).

3) Promoción y colecta de plantas silvestres

En muchos países en desarrollo, el sector campesino todavía obtiene una porción significativa de su subsistencia a través de las plantas silvestres alrededor de los cultivos.

En muchas regiones, los agricultores dejan voluntariamente algunas especies de malezas en los campos relajando así su control, lo cual permite obtener dos cosechas(Altieri & Nicholls, 2008)

4) Sistemas de Agroforestería

Muchos agricultores siembran sus cultivos en arreglos agroforestales utilizando la cobertura de los árboles para proteger los cultivos contra fluctuaciones extremas en microclima y humedad del suelo. Los agricultores ejercen influencia sobre el microclima conservando y plantando árboles, los cuales reducen la temperatura, velocidad del viento, evaporación, y exposición directa a la luz del sol e interceptan granizo y lluvia. Claramente, la presencia de árboles en diseños de agroforestería constituye una estrategia clave para la mitigación de la variabilidad del microclima y sistemas de agricultura minifundistas(Altieri & Nicholls, 2008).

5) Manejo e incremento de la materia orgánica del suelo

La materia orgánica incrementa notoriamente la capacidad de absorción de humedad de los suelos vía varios mecanismos:

- a) Los residuos orgánicos que cubren el suelo protegen al suelo del impacto de las gotas de lluvia evitando el agrietamiento, incrementando la infiltración del agua lluvia y reduciendo la escorrentía.

El aumento del contenido de materia orgánica contribuye indirectamente a la porosidad del suelo al condicionar una mayor actividad de la fauna edáfica. Una mayor infiltración combinada con un alto contenido de materia orgánica resulta en

un incremento de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo. La materia orgánica puede almacenar agua hasta 20 veces su peso(Altieri & Nicholls, 2008).

- b) La adición de materia orgánica también incrementa la cantidad de micro y macro-poros, formando agregados o creando condiciones favorables para el crecimiento de organismos edáficos como lombrices de tierra, las cuales modifican positivamente la estructura del suelo(Altieri & Nicholls, 2008).

7.3.3. Agricultura Colombiana: Adaptación al Cambio Climático.

Tabla 18. Estrategias de adaptación de la agricultura colombiana.

Ejemplos de impacto y medidas potenciales de adaptación		
Impactos previstos	Medidas de adaptación	Cultivos que probablemente se verán afectados
Cambios en la fenología del cultivo y el consiguiente impacto sobre el flujo de los productos hacia los mercados y cadenas de abastecimiento	Cambios en fechas de siembra y cosecha. Cambios en infraestructura para cultivos perennes (riego, drenaje).	Café, musáceas, arroz de secano, maíz, soya, frijol, árboles frutales
Inundación de tierras agrícolas debido al aumento en el nivel del mar y la salinización de aguas subterráneas	Reubicación de actividades de acuerdo con los nuevos planes de ordenamiento territorial. Construcción de diques y barreras para prevenir la salinización y proteger los ecosistemas costeros.	Palma de aceite africana (costa Pacífica), musáceas (Urabá) y ganadería (costa Caribe)
Cambios en plagas y enfermedades: aumento de la prevalencia y desplazamiento a nuevas regiones	Investigación en razas resistentes o tolerantes. Implementación de sistemas de monitoreo y de alerta temprana para poder implementar el manejo sostenible.	Café (por debajo de los 1500 msnm), musáceas (por debajo de los 500 msnm), papa (por encima de los 2500 msnm), yuca, árboles frutales
Intensificación de los procesos de degradación y desertificación de la tierra	Manejo agronómico sostenible y mejorado para aumentar la resiliencia del suelo.	Papa y yuca en las laderas andinas, ganadería en las tierras bajas (Amazonia, Llanos Orientales, costa Caribe)
Aumento en la vulnerabilidad de los pequeños productores a la variabilidad del clima y al cambio climático	Creación de subsidios de adaptación y de un sistema de seguros agrícolas para los productores de vertientes y para las áreas muy secas del Caribe. La industria y el gobierno deben invertir en investigación, extensión y transferencia de tecnologías para apoyar a los pequeños productores.	Todos los cultivos (se deben atender primero los sectores con dispersión significativa dentro del país)
Riesgo de pérdida (o extinción) de los recursos fitogenéticos que actualmente estén mal representados o no se los esté conservando <i>ex situ</i>	Financiación e incentivos gubernamentales para estimular la conservación de recursos fitogenéticos. Análisis de zonas de alto riesgo. Colección de recursos genéticos. Priorización de las actividades que requieren mejoramiento genético (siguiente columna).	Prioridad: razas nativas silvestres y cultivadas de árboles frutales, y muchos parientes silvestres de cultivos, incluyendo yuca, frijol, papa y tomate, entre otros.
Pérdida gradual de la aptitud climática de cultivos y pasturas, y disminución de la productividad, incluyendo el abandono de las tierras agrícolas actuales	Investigación en material genético resistente al calor y programas de fitomejoramiento para los cultivos más vulnerables. Desarrollo de nuevas prácticas para sistemas agrícolas que puedan soportar temperaturas más altas.	Caña de azúcar, café (por encima de los 1500 msnm), papa (por debajo de los 2500 msnm), musáceas (por debajo de los 500 msnm), cítricos (tierras altas), ganadería

Fuente:(Lau, C.; Jarvis, A.; Ramírez, J. 2011)

7.3.4. Estrategias de los sistemas de producción agrícola y forestal ante el cambio climático.

La adaptación al cambio y variabilidad climática en la agricultura no es nueva. Los productores de países desarrollados pueden responder mejor ante el cambio climático con incrementos en el uso de insumos e inversión de capital, mientras que los países en desarrollo tienen menos opciones y deben confiar en los recursos disponibles en sus fincas o comunidades.

La adaptación al cambio climático en el Tolima debe considerar la investigación técnico-científica, capacitación y transferencia de tecnologías a los agricultores, con base en experiencias positivas. De esta manera, a continuación, se muestran algunas de las

estrategias que han adoptado los agricultores de esta zona, para adaptarse a las nuevas condiciones generadas por el cambio y la variabilidad climática.

7.3.4.1 Estrategias de adaptación al cambio climático de cultivos perennes.

Los sistemas de producción con cultivos perennes, tales como el café, cacao y frutales, son los menos afectados por el cambio climático. Las estrategias incluyen: el manejo sostenible de recursos, uso de riego, variedades resistentes a la sequía y a temperaturas altas. Adicionalmente, hay otras estrategias que son más exclusivas de los sistemas con cultivos perennes como el manejo de doseles de sombra.(Castañeda et al., 2013)

A continuación, se muestran las principales estrategias de adaptación al cambio climático:



Figura 18. Sistema agroforestal de producción de café con plátano y nogal cafetero.

Fuente:(Castañeda et al., 2013)

Los sistemas agroforestales (SAF) tienen un papel importante para mejorar la adaptación al cambio climático. Se ha encontrado que los SAF pueden modificar el microclima, es decir, mitigar las condiciones climáticas extremas de temperatura, precipitación, vientos fuertes o alta radiación solar(Castañeda et al., 2013).



Figura 19. Sistema agroforestal de producción de café con plátano y nogal cafetero.

Fuente: (Castañeda et al., 2013)

Selección de fecha de siembra y cosecha

Con esto se buscado que la época ideal de siembra y la mejor oferta ambiental coincidan y de esta manera asegurar la mayor expresión genética y de producción del cultivo, además de cultivar el material vegetal que mejor muestre adaptabilidad y estabilidad para la zona agroclimática. Es importante que las épocas de establecimiento de los cultivos sean las más adecuadas para minimizar la mortalidad de plántulas por déficit de humedad o condiciones de temperaturas extremas. Es indispensable que las plántulas estén en óptimas condiciones para llevarlas al sitio definitivo en campo (Castañeda et al., 2013).



Figura 20. Manejo de almácigos para el establecimiento de cafetales.

Fuente: (Castañeda et al., 2013)

Selección de materiales vegetales mejor adaptados

Dicha selección de los mejores materiales, en cuanto a su adaptación a las condiciones climáticas, está directamente relacionado con el conocimiento técnico sobre estos y su adecuada época de siembra y del manejo agronómico que se les dé. Se debe prestar importante atención a diferentes tipos de resistencia o tolerancia, tal como calor, sequía, inundaciones, enfermedades y plagas. Estas condiciones permitirán que los materiales seleccionados expresen su potencial de rendimiento. De igual manera, la selección del material vegetal debe cumplir con las exigencias climáticas de la zona. Asimismo, es importante implementar un sistema de monitoreo y de alerta temprana para poder efectuar un manejo y toma de decisiones sostenibles respecto del uso de agroquímicos y fertilizantes(Castañeda et al., 2013).

El manejo del agua

El manejo de este recurso es vital para la agricultura. La captación del agua de lluvia y los sistemas de almacenamiento, riego y distribución de este insumo son esenciales para la integración de estrategias de adaptación frente al cambio climático, así como la protección de fuentes o cuerpos de agua, con la siembra y mantenimiento de especies arbóreas nativas(Castañeda et al., 2013).

El manejo del suelo

Es primordial la reducción de la compactación y mejorar los drenajes, especialmente para evitar excesivo arrastre de suelo y deslizamientos. Se recomienda cambiar las estrategias de labranza para reducir el uso de fertilizantes sabiendo que, a altas temperaturas durante el día, la absorción de las plantas de nitrógeno es mínima y, por el contrario, se incrementa la demanda de fósforo. Otro aspecto para considerar es reducir la contaminación por agroquímicos, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y el alto gasto de energía y capital(Castañeda et al., 2013).

El segundo paso es el monitoreo, que consiste en el seguimiento a la población de agentes problemáticos y los daños ocasionados por estos. Posteriormente, es importante realizar prácticas culturales que disminuyan la población de los agentes problemáticos y favorecer a sus controladores naturales. Como medidas extremas se debe considerar el uso de productos de síntesis química siempre y cuando sean específicos para la plaga y de baja categoría toxicológica(Castañeda et al., 2013).

7.3.5. Representaciones de agricultores andinos colombianos sobre el cambio climático y estrategias de mitigación y adaptación.

Las experiencias que han vivido los agricultores y sus familias en los nuevos escenarios climáticos, los cuales han perturbado la vida cotidiana de la región montañosa andina los está llevando a generar respuestas locales para mitigar los efectos de las olas de calor o las intensas lluvias y adaptar sus sistemas de producción para preservar las fuentes de agua, los suelos, su biodiversidad, su comodidad, su salud y bienestar (Carrero, 2021).

Tabla 19. Estrategias de los agricultores andinos colombianos.

Estrategias de los agricultores
Estrategias de mitigación
Reforestar fuentes de agua con especies nativas
No cazar animales silvestres
Plantación de árboles para la sombra en plantaciones de café y pastos
Hacer uso eficiente del agua para el riego y las actividades ganaderas
Estrategias de adaptación
Adaptación de las horas de trabajo a las condiciones climáticas
Fumigación contra plagas de cultivos
Proteger a la familia del ataque de los mosquitos
Implementación de buenas prácticas de gestión de cultivos
Usar ropa apropiada para el clima
Prevención de riesgos de enfermedad en la familia

Fuente: esta investigación con datos de (Carrero, 2021)

Entre las estrategias para mitigar el cambio climático, la conservación del agua ha sido una prioridad para los agricultores debido a su importancia para el desarrollo del trabajo agrícola y el consumo familiar. En consecuencia, las acciones comenzaron a girar en torno a la reforestación de las fuentes de agua con especies nativas; la reducción de la caza de animales salvajes; plantación de especies arbóreas que brinden sombra al café y pastos y el buen uso del agua para riego de cultivos y actividades ganaderas (Carrero, 2021).

Asimismo, dentro de las respuestas de adaptación a las altas temperaturas, las variaciones en las precipitaciones y la disminución del suministro de agua, la adaptación de los calendarios de trabajo de campo y el uso de ropa adecuada al clima destacan, seguido de la fumigación de cultivos para protegerlos de plagas y enfermedades, protección con mosquiteros contra el ataque de los mosquitos, buenas prácticas agrícolas y por último la prevención de enfermedades relacionadas con el clima en las familias (Carrero, 2021).

7.3.6. Efectos del cambio climático: Una mirada al campo.

En el departamento de Nariño se han realizado algunas acciones para reducir el impacto del cambio climático, algunas de estas son:

Sistemas silvopastoriles sostenibles: existen estudios sobre la implementación de sistemas silvopastoriles, que combinan plantas forrajeras, arbustos y árboles; los cuales pueden aportar a la protección de zonas de recarga hídrica.

Los sistemas silvopastoriles proporcionan sombra, conservan la humedad del suelo y reducen la temperatura en algunas zona. Además, pueden usarse para recuperar suelos de pastoreo degradado y como sumideros de carbono, así como corredores y refugio para la biodiversidad, además de que existe una amplia variedad de especies arbóreas que pueden ser utilizadas lo que representa una ventaja al momento de implementar este sistema (N & N., 2018).

Cosecha del agua, reservorios y lluvia sólida. Asegurar la disponibilidad y propiciar su uso eficiente es imprescindible para enfrentar el cambio climático desde el sector

agropecuario. Para esto se han desarrollado técnicas que incluyen las *amunas*, diques, atajados y lluvia sólida. Las *amunas*, son sistemas peruanos de recarga artificial de acuíferos, que utilizan zanjas abiertas para conducir el agua lluvia hasta reservorios. También se pueden construir diques, los cuales almacenan importantes cantidades de agua en las zonas de ladera, la cual se utiliza para los animales o el riego de los cultivos (N & N., 2018).

Los atajados son reservorios bolivianos que se construyen a partir de excavaciones, donde se recolecta agua de escorrentía y es usada en el momento en que se presente sequía, de esta manera se reduce el riesgo de perder las cosechas en tiempo de escasez de agua. Finalmente, la lluvia sólida es un desarrollo mexicano, el cual almacena agua lluvia en forma de una sustancia polimérica de acrilatos de potasio súper absorbente (tienen la característica de ser altamente higroscópicos; es decir, absorben grandes cantidades de humedad). Como resultado se obtiene agua en pequeños pedazos, sin modificar su estructura química. Este material no se pierde por efecto de la filtración, por lo que es ideal para sembrar en zonas áridas, áreas de bajas precipitaciones y en parcelas sin riego (N & N., 2018).

8. Recomendaciones

En esta sección, se describe a continuación una propuesta para la adaptación de los cultivos a la variabilidad y cambio climático, desde la perspectiva del administrador. Ya que este se encuentra en la capacidad de administrar científicamente la problemática ambiental del territorio y la oferta de recursos en el ámbito biofísico y sociocultural, de esta manera se promueve el desarrollo sostenible de los territorios.

La adaptación basada en ecosistemas (AbE) se define como el uso de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos como parte de una estrategia de adaptación ante los efectos del cambio climático. Las prácticas AbE incluyen actividades de conservación, restauración y manejo sostenible de los ecosistemas naturales y construidos para ayudar a las sociedades a adaptarse.(Rodríguez et al., 2017).

La AbE puede ser aplicada en diferentes ecosistemas, como ecosistemas costeros (manglares, humedales), bosques secos o lluviosos, o bosques nubosos y de montaña. En los sistemas agrícolas y pecuarios, las prácticas que se consideran de AbE son aquellas que aprovechan los procesos naturales, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos para ayudar a los sistemas agropecuarios y a los productores a adaptarse.(Rodríguez et al., 2017)

Estas prácticas son consideradas como aptas para pequeños productores, ya que pueden ser utilizadas fácilmente por los productores, sin necesidad de conocimiento tecnológico complejo o materiales difíciles de conseguir. Además de su falta de capital financiero para invertir en sus fincas o adoptar nuevas tecnologías.

A continuación, se describen algunas de las prácticas que se encuentran dentro de la AbE y que han sido estudiadas dentro del programa de Administración Ambiental y por tanto son mencionadas en este punto.

A. Sistema Quesungual y árboles dispersos

Este sistema está basado en una práctica que consiste en sembrar el cultivo anual en combinación con árboles dispersos. Tradicionalmente esta práctica está relacionada con el cultivo de maíz y frijol, pero en la actualidad también se ha relacionado con cultivos como el sorgo (*Sorghum vulgare*) y el melón (*Cucumis melo*) (Rodríguez et al., 2017).

Existen cuatro principios básicos para el establecimiento y mantenimiento de este sistema:

- No tala y no quema: Se realiza un manejo de la tala y poda parcial, selectivo y progresivo de la vegetación natural. Cuando el productor no quema, está permitiendo que se acumulen en el suelo aquellos residuos de la cosecha y de esta manera, al descomponerse se convierten en materia orgánica, mejorando las condiciones físico-químicas del suelo donde se cultiva.

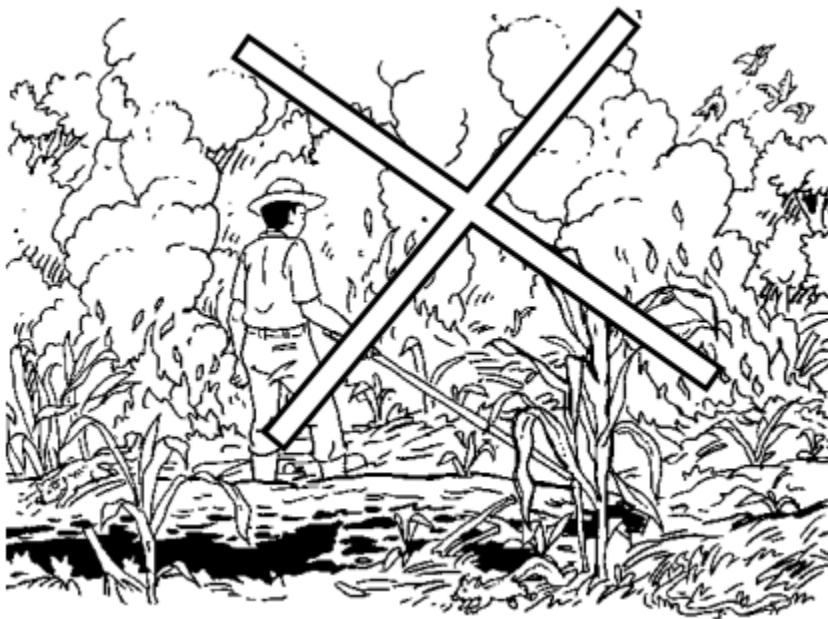


Figura 21. Representación no quema de los cultivos.

Fuente: (Rodríguez et al., 2017)

- Cobertura permanente del suelo: Se deposita y se distribuye continuamente la cobertura proveniente de la biomasa de los árboles, arbustos, malezas y residuos de cultivos (Castañeda et al., 2013).
- Mínima perturbación del suelo: A través de técnicas de cero labranza a lo largo de la estación de cultivo (Se elimina el movimiento del suelo y los residuos de las cosechas anteriores, con lo cual se reduce la erosión y se permite manejar la humedad e incorporar nutrientes.) y de la siembra directa de la semilla (La siembra directa permite superar los problemas de la erosión y degradación de los suelos) (Castañeda et al., 2013).
- Uso eficiente de fertilizantes: realizar la fertilización de manera eficiente, utilizando dosis precisas, colocar el fertilizante en el lugar correcto para la absorción de la

planta y evitar fertilizar cuando no está lloviendo, son parte de las buenas prácticas agrícolas que este sistema requiere para su funcionamiento (Castañeda et al., 2013).

Para establecer este sistema, los productores seleccionan un guamil o barbecho que haya estado en descanso entre seis a doce años, con árboles de un DAP (diámetro altura pecho) mayor a diez centímetros y arbustos con más de un metro de altura (Rodríguez et al., 2017).

Cuando se realiza la cosecha del frijol, se deja que este se seque en mazos o manojos de plantas sobre los arbustos podados hasta que estos se sequen, de modo que sea fácil aporrearlos. Los rastrojos producidos se dejan en la parcela. La cosecha de la bellota de sorgo se hace dejando el resto de la planta en la parcela.



Figura 22. Cosecha de frijol sobre arbustos.

Fuente: (Rodríguez et al., 2017)

Contribución del uso sistema Quesungual a la adaptación y mitigación del cambio climático

La sombra que proporciona este sistema agroforestal ayuda a regular la temperatura y mejora la productividad del sistema. Esto es muy importante en zonas semiáridas que además están enfrentando el aumento de la temperatura y la reducción de las cosechas. Además, en el caso de lluvias extremas, la cobertura permanente del suelo hace que el impacto de las gotas sea menor, y se reduzca la compactación del suelo (Rodríguez et al., 2017).

B. Barreras vivas

Las barreras vivas son plantas sembradas en línea a distancias cortas, están sembradas en el terreno de manera perpendicular a la pendiente de la ladera. Esta práctica reduce la velocidad del agua de lluvia que se escurre por el suelo, reduciendo la erosión y la pérdida de suelo. Además, como las plantas que se usan son de crecimiento denso, retienen gran

cantidad de suelo y nutrientes. Este sistema aumenta la filtración del agua ayudando a conservar por mayor tiempo la humedad en el suelo (Rodríguez et al., 2017).



Figura 23. Barreras vivas.

Fuente: (Rodríguez et al., 2017)

Contribución del uso de barreras vivas a la adaptación y la mitigación del cambio climático

Las barreras vivas tienen beneficios tanto en caso de sequías como de lluvias extremas. Se identificado que incrementan la humedad del suelo en los agroecosistemas de maíz y que reducen la posibilidad que ocurra un derrumbe debido a la perturbación del suelo. Estos aspectos son importantes en un contexto de incremento de la frecuencia y severidad de lluvias extremas y sequía (Rodríguez et al., 2017).

C. Cercas vivas y barreras rompevientos

Los árboles en forma lineal son establecidos para separar parcelas, separar animales de cultivos o potreros y para proteger cultivos de vientos fuertes y erosión. Las cercas vivas y las barreras rompevientos tienen en común la siembra de árboles o arbustos de manera lineal. Según la función en el ambiente, difieren en ancho, espaciamiento y la composición específica de las hileras (Rodríguez et al., 2017).

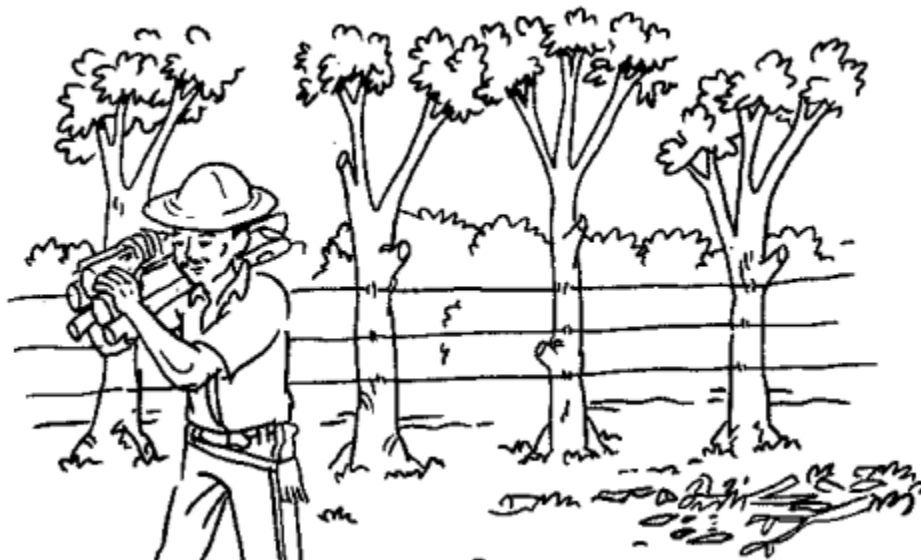


Figura 24. Cercas vivas.

Fuente: (Rodríguez et al., 2017)

La función de las barreras rompevientos es dar protección, ya sea a los cultivos, a los animales, a las fuentes de agua, a los suelos y/o a la infraestructura de los vientos extremos.

Para el establecimiento de las cortinas rompevientos se debe tomar en cuenta la dirección del viento, la topografía del terreno y el tipo de cultivo que se está protegiendo. En general, las cortinas rompevientos deben estar establecidas en dirección perpendicular a los vientos dominantes. Para un mejor funcionamiento de la barrera, las plantas de diferentes tamaños deben formar un mosaico de dos dimensiones, con una permeabilidad de 20 a 50% de la barrera, para evitar turbulencia del lado del viento (Rodríguez et al., 2017).

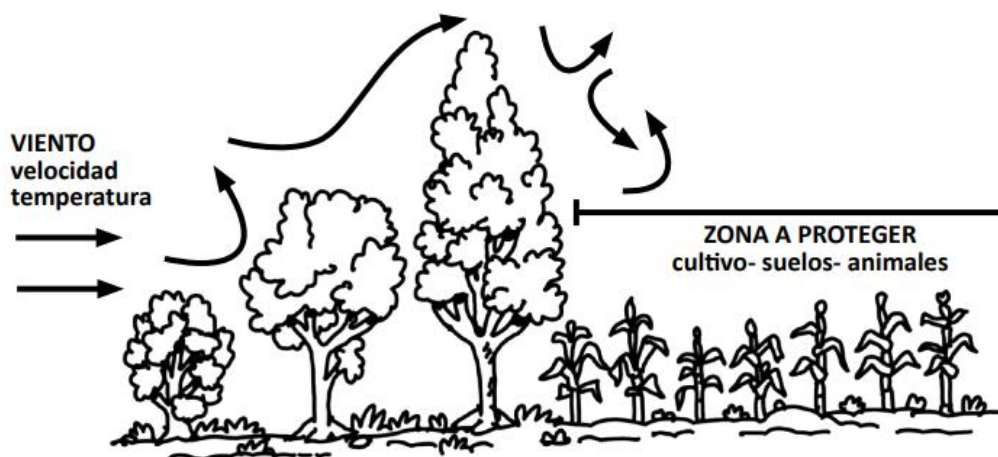


Figura 25. Barrera rompeviento.

Fuente: (Rodríguez et al., 2017)

Contribución del uso de barreras vivas a la adaptación y la mitigación del cambio climático

En el panorama actual de cambio climático que se vive, es inminente que los vientos extremos y los huracanes con vientos fuertes sean más frecuentes. Por su diseño, la función fundamental de la barrera rompeviento es la reducción de la velocidad de los vientos que logran atravesarla, siendo su principal función adaptativa. Además, parte de los vientos son desviados, por lo que los animales y cultivos se protegen de posibles vientos extremos. Adicionalmente, las barreras rompevientos afectan la temperatura del viento, volviéndolos más frescos en los lugares muy calientes y más templados en los lugares muy fríos, lo cual es importante para lidiar con las temperaturas extremas (Rodríguez et al., 2017).

Las cercas vivas consisten en árboles espaciados en una hilera, que se usan para colocar alambre o palos para separar una parcela (o potrero) de otra. Idealmente, las especies que se plantan son árboles que se pueden podar fácilmente, dos o tres veces al año, y de fácil establecimiento por estaca (Rodríguez et al., 2017).

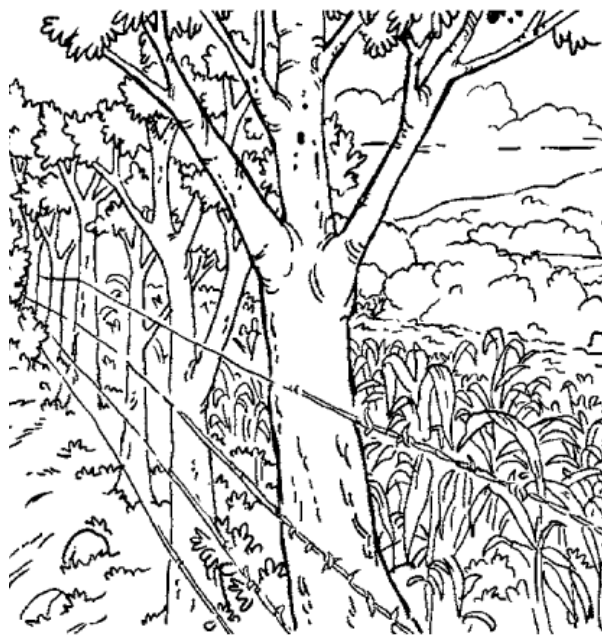


Figura 26. Cercas vivas.

Fuente: (Rodríguez et al., 2017)

Contribución del uso de barreras vivas a la adaptación y la mitigación del cambio climático

Las cercas vivas pueden bajar la temperatura del suelo debido a la mayor retención de humedad donde están ubicadas. Adicionalmente, se espera que la temperatura del aire en una parcela rodeada con cercas vivas sea más estable que sin ella. La humedad relativa de las parcelas cercanas aumenta con la presencia de cercas vivas, reduciendo la tasa de evapotranspiración de los cultivos, este efecto decrece a medida que se aleja de la cerca viva. Esta tasa de menor de evapotranspiración se traduce en mayor conservación del agua

en la planta, evitando el estrés hídrico. Finalmente, aunque su objetivo principal no sea el mismo que el de una cortina rompeviento, las cercas vivas también pueden proteger moderadamente del viento extremo (Rodríguez et al., 2017).

D. Rotación de cultivos

Es la siembra sucesiva de diferentes cultivos en el mismo terreno, que busca romper ciclos biológicos de plagas y enfermedades, aportar nutrientes y elevar la materia orgánica del suelo.

Este sistema es otra forma de reducir el agotamiento del suelo. La rotación implica la alternancia de gramíneas, las cuales son exigentes en suelos, y leguminosas (aportan nitrógeno al suelo) (Castañeda et al., 2013).

Beneficios

- Reducción de la incidencia de plagas y enfermedades: el cambio de cultivo supone un cambio de hábitat, por lo tanto, los ciclos de vida de las plagas y enfermedades se interrumpe.
- Proporciona una distribución más adecuada de los nutrientes en el suelo.
- Ayuda a disminuir los riesgos económicos, en el caso de que se presente alguna eventualidad que afecte a alguno de los cultivos (Castañeda et al., 2013).

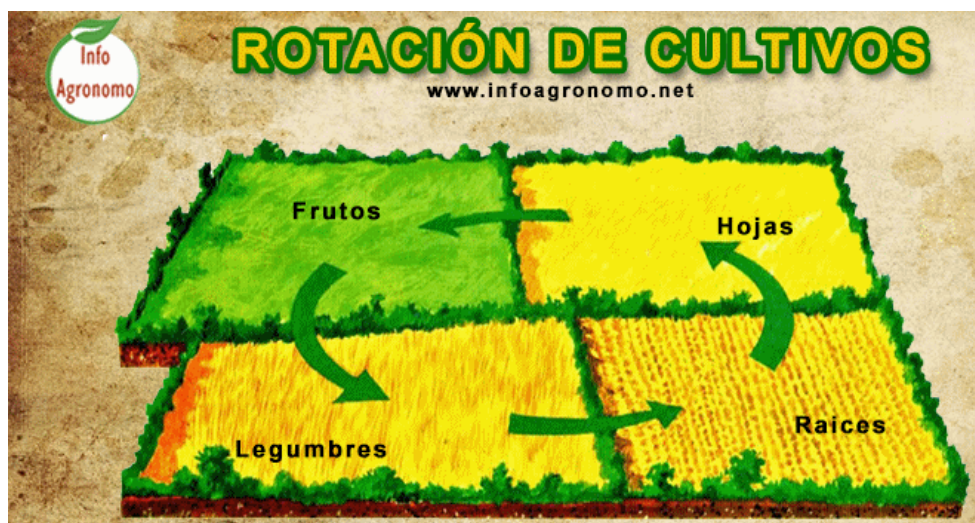


Figura 27. Rotación de cultivos.

Fuente: www.infoagronomo.net

9. Conclusiones

- La implementación de herramientas que ayuden a los pequeños agricultores a adaptarse al cambio climático puede verse afectada en los países en vía de desarrollo, debido al capital con el cual cuentan estos individuos y la poca financiación que se les brinda.
- Como consecuencia de las alteraciones que se han producido en las plantas por el cambio climático, también se está alterando la estructura y distribución agrícola, lo cual puede producir un desequilibrio en la sociedad, ya que la seguridad alimentaria depende directamente del campo.
- El estudio de la respuestas fisiológicas y morfológicas puede ayudar a delimitar nuevas zonas aptas para los cultivos, de acuerdo a las proyecciones de cambio climático. Mediante el estudio de esta respuestas se pueden determinar cuales son los rangos ambientales en lo que las plantas podrían desarrollarse con normalidad debido a lo cambios que se puedan producir en el entorno.

10. Bibliografía

- Ali Raza, A. R. (2019). Impact of Climate Change on Crops Adaptation and Strategies to Tackle Its Outcome: A Review. *MDPI*, 2-29.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. (2008). *CAMPESINAS Y DE AGRICULTORES TRADICIONALES Y SUS RESPUESTAS ADAPTATIVAS*.
- Anjum, S. A., Xie, X., Wang, L., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). *Morphological , physiological and biochemical responses of plants to drought stress*. 6(9), 2026–2032. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.027>
- Carlos Alberto Ossa Ossa. (2017). *TGS. Conceptos y aplicaciones*.
- Carrero, D. M. (2021). *Representations of Colombian Andean farmers on climate change and mitigation and adaptation strategies*. 59(2), 1–18.
- Castañeda, H. J. A., Madrigal, M. A. S., Daza, D. S. C., Martínez, M. J. G., Quintero, M. del P. M., Ramírez, E. S., Ortiz, I. G. G., Collazos, J. J. A., & Morales, M. F. (2013). *Estrategias de adaptación al cambio climático en sistemas de producción agrícola y forestal en el departamento del Tolima*.
- Charlotte Lau, A. J. y Julián R. (1967). *Agricultura Colombiana : Adaptación al Cambio Climático*.
- F, L. P. M. (2009). *Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico . Una revisión Plant responses to water deficit stress . A review*. 27(2), 179–191.
- Facultad de Ingenieria Universidad del Valle. (2015). *Impactos ambientales de los monocultivos*.
- Florido, M., & Bao, L. (2014). *Revisión bibliográfica TOLERANCIA A ESTRÉS POR DÉFICIT HÍDRICO EN TOMATE (Solanum lycopersicum L .) Review Water stress tolerance in tomato (Solanum lycopersicum L .)*. 35(3), 70–88.
- González-robaina, F., Cisneros-zayas, E., & Montilla, E. (2017). *The coffee tree (Coffea arabica L .) response to water deficit in different development phases Respuesta al déficit hídrico del cafeto (Coffea arabica L .) en diferentes fases de desarrollo*. 26(3), 4–11.
- Gonzalo Torres Pezo. (2018). *Selección e identificación de 20 genotipos de cacao peruano (silvestres y domesticados) e internacionales, tolerantes al estrés hídrico en condiciones de vivero*.
- Hernández, Y. D., Noval, W. T. de, Cabello, J. R., & Hernández, P. R. (2014). *Comunicación corta RESPUESTA DE PLANTAS DE PAPAYA SILVESTRE (Carica cubensis Solms) AL ESTRÉS HÍDRICO Y DEL CRECIMIENTO Short communication Response of papaya silvester plants (Carica cubensis Solms) to water stress and rewatering : growth and physiol*. 35(3), 55–61.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (n.d.). *LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA*.

- Kovalsky París, G. M. (2004). *Respuestas genéticas de las plantas al estrés hídrico*.
- N, L. E. A., & N., J. E. B. (2018). *Efectos del cambio climático : Una mirada al Campo*
Effects of climate change : A look to Agriculture. 35(2), 79–91.
- organización de las naciones unidad para la alimentación y la agricultura. (n.d.). *Análisis de los sistemas agrícolas*.
- Poveda, G. (2004). *CIENCIAS DE LA TIERRA LA HIDROCLIMATOLOGÍA DE COLOMBIA : UNA SÍNTESIS DESDE LA ESCALA INTER-DECADAL*.
- Rodriguez, R. M., Viguera, B., Donatti, C. I., Harvey, C. A., & Alpízar, F. (2017). *Cómo Enfrentar El Cambio Climático Desde La Agricultura*. 40.
<https://www.mendeley.com/viewer/?fileId=5e8761e8-6825-10c1-556b-99273b2269e7&documentId=2accd612-d244-3cb3-b7bc-6472d41b982b>
- Salazar, E., Trujillo, I., Macías, M. P., Gutiérrez, M. A., & Castro, L. (2014). *Respuesta fisiológica al estrés hídrico de plantas de banano cv . ‘ Pineo gigante ’ (Musa AAA) regeneradas a partir de yemas irradiadas* *Physiological response to hydric stress of banana plants cv . ‘ Pineo*. 14(3), 155–162.
- Soriano, E. F. (2017). *Mecanismos de protección frente al déficit hídrico reiterado en plantas Eva Fleta Soriano*.
- Turbay, S., Nates, B., Jaramillo, F., Vélez, J. J., & Ocampo, O. L. (2014). Adaptación a la variabilidad climática entre los caficultores de las cuencas de los ríos Porce y Chinchiná , Colombia *Adaptation to climate variability among the coffee farmers of the watersheds of the rivers Porce and Chinchiná , Colombia*. *Investigaciones Geográficas: Boletín Del Instituto de Geografía*, 2014(85), 95–112.
<https://doi.org/10.14350/rig.42298>
- Universidad Politécnica de Valencia. (2003). *Fitorreguladores*.
- Valladares, F., Vilagrosa, A., Peñuelas, J., Ogaya, R., Julio, J., Corcuera, L., & Sisó, S. (2004). *CAPÍTULO 6 Estrés hídrico : ecofisiología y escalas de la sequía*. 163–190.
- Vázquez, M. N., Dell, J., Rodríguez, A., Hernández, C. P., & Grandal, B. (2017). *Revisión bibliográfica Review Water and saline stress on citrus . Strategies for reducing plant damages*. 38(4), 65–74.
- Weinert, H., & Yana, W. (2001). *Técnicas de sistemas agroforestales multiestrato*.